



Geraldo Samuel Marques Almeida

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Ramo de Energia

**Pesquisa e Desenvolvimento de um
Sistema Termoelétrico do tipo
*Linear Fresnel Reflector***

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Energias Renováveis – Conversão Elétrica e Utilização Sustentável

Orientador: Stanimir Valchev, Professor Auxiliar, FCT, UNL

Coorientador: Pedro Matos, Professor Adjunto, ESTT, IPT

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Mário Fernando da Silva Ventim Neves

Arguente: Prof. Doutora Valentina Borissovna Vassilenko

Vogais: Prof. Doutor Stanimir Stoyanov Valtchev

Prof. Doutor Pedro Manuel Granchinho de Matos



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

março de 2013

Geraldo Samuel Marques Almeida

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

**Pesquisa e Desenvolvimento de um
Sistema Termoelétrico do tipo
*Linear Fresnel Reflector***

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Energias Renováveis – Conversão Elétrica e Utilização Sustentável

Orientador: Stanimir Valchev, Professor Auxiliar, FCT, UNL

Coorientador: Pedro Matos, Professor Adjunto, ESTT, IPT

março de 2013

**Pesquisa e Desenvolvimento de um Sistema Termoelétrico
do tipo *Linear Fresnel Reflector***

Copyright © Geraldo Samuel Marques Almeida,

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Agradeço ao Professor Stanimir Valchev orientador desta dissertação o apoio, a disponibilidade, o rigor, e a exigência demonstrados durante a produção deste trabalho.

Quero igualmente agradecer ao coorientador Professor Pedro Granchinho pela sua disponibilidade, apoio e ajuda durante a execução dos trabalhos.

Agradeço igualmente ao Sr. Moisés e ao Sr. Fernando pelos conselhos dados e por terem dedicado parte do seu tempo e trabalho à construção do protótipo final. A eles estou inteiramente grato.

A título pessoal gostaria de agradecer a todos os meus amigos do mestrado em energias renováveis o apoio demonstrado, pela paciência para os meus queixumes, ajuda, amizade, companhia e por estarem sempre comigo.

Obrigado do fundo do meu coração à minha namorada Carla Vieira por todo o apoio, força e compreensão que me deu ao longo deste trabalho. O seu amor transformou todas as adversidades em momentos de resiliência.

Finalmente gostaria de deixar um agradecimento especial aos meus pais Alda Almeida e Leonel Marques por me terem apoiado e incentivado a estudar. A eles dedico este trabalho.

É com muita satisfação que expresso aqui o mais profundo agradecimento a todos aqueles que tornaram a realização desta dissertação possível.

“Nunca te contentes com o quê: trata também de descobrir o porquê e o como.”

(Baden Powell)

Resumo

A pesquisa de novos conceitos e materiais relacionados com a energia solar concentrada têm despertado o interesse dos mais variados grupos industriais e instituições científicas. Este interesse é justificado pelo baixo custo de investimento e pelos elevados rendimentos de conversão, que são típicos neste tipo de tecnologia solar.

O projeto em curso não surgiu para resolver um problema concreto do mercado, ou da indústria de energia solar, mas sim, para desenvolver uma aplicação de pequena escala, para um concentrador solar inovador do tipo refletor linear Fresnel.

Este projeto reveste-se de alguma importância para as energias renováveis. Pois, se for bem sucedido, uma pessoa comum poderá passar a produzir eletricidade e águas quentes.

O projeto em curso aborda a metodologia necessária no desenvolvimento de um concentrador solar do tipo refletor linear Fresnel, nomeadamente as eficiências térmica e ótica. As quais estão relacionadas respetivamente com os aspetos de transferência de calor e com os parâmetros de construção.

O protótipo é composto por seis refletores orientados para um recetor trapezoidal de cavidade aberta. Colocado no foco do recetor, encontra-se um absorvedor pintado com tinta seletiva. O recetor linear está elevado sobre os espelhos que possuem uma orientação norte-sul, favorável à captação dos raios solares ao longo do dia.

O sistema desenvolvido mostrou durante os testes realizados em ambiente real, bons resultados ao nível da temperatura atingida e ao nível do rendimento ótico.

Porém a experiência sugere que o seguimento solar neste tipo de concentrador seja uma questão a ser debatida em trabalhos futuros.

Os dois objetivos que o projeto visa atingir são: a comparação entre o concentrador Disco Parabólico com o LFR e a implementação de um modo de armazenamento direto de calor.

Palavras chave:

termoeletricidade de concentração solar; concentrador refletor linear Fresnel; modelo de radiação solar ESRA; rácio de concentração

Abstract

The research on the solar concentrating equipment was intensified in the recent years in many scientific and industry groups and institutions. This growing interest is based mainly on the higher efficiency and lower investment in material that is typical for this kind of solar technology.

If the project proves to be successful, in the future it will enable to build a sustainable home that produces simultaneously electricity and hot water. This will be an important step for the renewable energies development.

This study presents a design methodology and theoretical performance analysis of a linear Fresnel reflector solar concentrator with a tubular absorber inserted into a trapezoidal inverted air cavity without glass cover.

To achieve that aim, a MATLAB simulation program was developed in order to optimize the design parameters of the concentrator, including the angle of inclination of the mirrors, the concentrator aperture area and the width of the reflector, for a preé-established height of the absorber above the reflector plane. The optimized value of each design parameter was used to find the best concentration ratio and the maximum optical efficiency, leading to the calculation of the maximum energy delivered onto the tubular absorber.

The constructed linear Fresnel reflector prototype consists of 6 mirrors, oriented North-South, that manually are tracking the sun position during the day.

This construction has shown good results validated by measurements made on the temperature of the outlet fluid during outdoor tests.

The two main objectives of this work are to compare the Parabolic Dish reflector to the newly designed LFR prototype and to develop of a new direct type of heat storage method.

Keywords:

concentrated solar power, linear Fresnel reflector; clear sky model of the European Solar Radiation Atlas; concentration ratio

ÍNDICE DE MATÉRIAS

1 Introdução.....	1
1.1 Motivação	1
1.2 Definição do problema de investigação	2
1.3 Estrutura	3
2 Desenvolvimento.....	5
2.1 A energia, o que é.....	5
2.1.1 Disponibilidade e evolução do consumo mundial de energia primária	6
2.2 Energia solar.....	8
2.2.1 Tecnologias de conversão solar	9
2.3 Energia solar de concentração	12
2.3.2 História da energia solar de concentração	14
2.4 Tecnologias de energia solar térmica de concentração.....	17
2.4.1 Canal parabólico	17
2.4.2 Fresnel linear	18
2.4.3 Fresnel linear compacto	18
2.4.4 Disco parabólico.....	19
2.4.5 Torre solar.....	20
2.5 Armazenamento e hibridização	22
3 Modelos e métodos	25
3.1 Conceitos gerais de heliotecnia.....	25
3.2 Modelo de orientação solar	27
3.2.1 Declinação solar.....	27
3.2.2 Ângulo horário.....	28
3.2.3 Hora solar	28
3.2.4 Ângulo de zénite e de elevação solar	29
3.3 Modelo de Radiação solar	31
3.3.1 Irradiância global horizontal sob céu limpo.....	31
3.3.2 Irradiação global horizontal sob céu limpo	33
3.4 Dimensionamento do concentrador solar.....	36

3.4.1 Distância entre espelhos	36
3.4.2 Altura do recetor.....	36
3.4.3 Rácio de concentração.....	38
3.4.4 Propriedades óticas dos materiais	39
3.5 Modelação Térmica.....	41
3.5.1 Balanço de energia	41
3.5.2 Ganhos térmicos	41
3.5.3 Perdas térmicas	41
3.5.4 Refletores secundários.....	43
3.5.5 Superfície absorvedora seletiva.....	44
3.5.6 Eficiência térmica	44
4 Análise e Discussão de Resultados	45
4.1 Cálculos solares.....	46
4.2 Dimensionamento	47
4.2.1 Rácio de concentração.....	48
4.3 Recetor	49
4.3.1 Armazenamento de calor.....	51
4.3.2 Aquecimento de águas.....	53
5 Conclusões e recomendações futuras	55
5.1 Cálculos solares.....	55
5.2 Dimensionamento	55
5.3 Concentrador Solar	57
5.4 Trabalhos Futuros	58
6 Referências Bibliográficas	59
7 Anexos.....	61
7.1 Dimensionamento	62
7.1.1 Rácio de concentração.....	63
7.2 Dados Reais Irradiância	64
7.3 Dados Reais Irradiação.....	65

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Vários tipos de coletores solares térmicos [6]	9
Tabela 2: Dados das 9 centrais comerciais SEGS [9]; [10]; [11]	15
Tabela 3: Caracterização em função do tipo de recetor e de foco [12].....	21
Tabela 4 Coeficientes L_{ij} para o cálculo dos coeficientes C_i	34
Tabela 5 Parâmetros óticos assumidos para o coletor LFR	39
Tabela 6 Resultados do calculo iterativo.	62
Tabela 7 Resultados dos cálculos para o caso prático em estudo.	63
Tabela 8 Lista de centrais CSP [22]	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Projetos CSP em desenvolvimento (azul), em construção (vermelho) e em operação (verde) na península ibérica. [17] [18]	2
Fig. 2 Gráfico do consumo mundial de energia primária de 1985 até 2010, em Mtoe-Million tonnes oil equivalent, adaptado de BP [13].....	6
Fig. 3 Gráfico das disponibilidades de energia primária, em Mtoe-Million tonnes oil equivalent, adaptado de LBST [14]	7
Fig. 4 Classificação dos vários tipos de coletores solares. Adaptado de [6]	10
Fig. 5 Processos químicos de produção de hidrogénio, via CSP. Adaptado de [1]	12
Fig. 6 Disco parabólico de Abel Pifre (1852-1928), que em 1881 utilizou para accionar uma máquina de prensa gráfica [26].	14
Fig. 7 "Pirelióforo" do Padre Himalaya, com uma superfície refletora de 80 m ² , formado por 6177 espelhos [3].	14
Fig. 8 Colectores solares de Shuman, localizados em Al Meadi, Egipto.	14
Fig. 9 Ilustração do conceito canal/cilindro parabólico, adaptado de [12]	17
Fig. 10 Ilustração do conceito Frenel linear, adaptado de [12]	18
Fig. 11 Ilustração do conceito CLRF, representando a ausência de sombras entre espelhos [4]	19
Fig. 12 Ilustração do conceito disco-parabólico, adaptado de [12]	19
Fig. 13 Ilustração do conceito torre solar, adaptado de [12]	20
Fig. 14 Perfil típico de operação de uma central solar termoelectrica [12]	22
Fig. 15 Ciclos de progresso tecnológico e de crescimento económico mundial [19]	23
Fig. 16 Corte esquemático de um piranómetro [15]	25
Fig. 17 Ângulo de azimute solar z e ângulo de zénite solar θ_z , adaptado de [24]	26
Fig. 18 Gráfico da declinação solar ao longo do ano	27
Fig. 19 Gráfico da variação do valor da equação do tempo ao longo do ano.....	29
Fig. 20 Ângulo de zénite(θ_z) relacionado com o ângulo de altitude solar (α) e ângulo horário (ω) defenido apartir do Sul.....	30
Fig. 21 Espaçamento de espelhos (ΔX): Erro de precisão Vs. Sombreamento dos espelhos	36
Fig. 22 Altura do recetor (h_r): Erro de precisão Vs. Obstrução dos espelhos.....	37
Fig. 23 Corte transversal de um sistema refletor Fresnel linear com um absorvedor de cavidade trapezoidal. [5]	37
Fig. 24 Géneros de refletores secundários propostos para um sistema Fresnel linear.	43
Fig. 25 Projeção dos raios refletidos por (2x)6 espelhos. À direita pormenor da projeção dos raios no recetor situado a 2500 mm de altura, (largura do espelho (W) 401 mm).	47
Fig. 26 Distribuição dos raios para uma concentração de 19,8; largura do espelho $W = 100$ mm, altura do recetor $f = 1300$ mm [5]	47
Fig. 27 Relação entre o rácio de concentração e o número de espelhos.....	48
Fig. 28 Variação do rácio de concentração em função da largura dos espelhos e altura do foco.....	49

Fig. 29 Vista em corte do recetor, onde é apresentado o isolamento e coletor.	50
Fig. 30 Temperatura do depósito de sal (tipo de acabamento).....	51
Fig. 31 Temperatura do depósito de sal (tipo de concentrador)	51
Fig. 32 Depósito de sal, no interior da cavidade trapezoidal e à dir. depósito de sal instalado no concentrador Disco Parabólico.....	52
Fig. 33 Temperatura da água (concentrador parabólico).....	53
Fig. 34 Esquema de um concentrador solar, sistema LFR.	62
Fig. 35 Irradiância solar para o dia 15 de Setembro.....	64

LISTA DE ACRÓNIMOS

CLRF	Compact Linear Fresnel Reflector
CPV	Concentrated Photo Voltaic
BP	British Petroleum
CPC	Compound Parabolic Collector
CSP	Concentrated Solar Power
DNI	Direct Normal Irradiation
DoE	Department of Energy
ESRA	European Solar Radiation Atlas
ETC	Evacuated Tube Collectors
FER	Fontes de Energia Renovável
FPC	Flat Plane Collectors
HCE	Heat Collector Element
HFC	Heliostat Field Collector
HTF	Heat Transfer Fluid
ID	Inovação e Desenvolvimento
IEA	International Energy Agency
ISCCS	Integrated Solar Combined Cycle Systems
LBST	Ludwig-Bölkow-Systemtechnik
LFR	Linear Fresnel Reflector
MENA	Middle East and North Africa
Mtoe	Million Tonnes of Oil Equivalent
NREL	National Renewable Energy Laboratory
PDR	Parabolic Dish Reflector
PTC	Parabolic trough Collector
PV	Photo Voltaic
SEGS	Solar Electricity Generating Systems

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

“Se nos questionássemos qual o motor da mudança em todo o mundo, muitos certamente responderiam: energia. É com base na energia que se vai operar a mudança mais importante no domínio económico internacional.” (Primeiro Ministro José Sócrates Pinto de Sousa, 2009)

Nas sociedades modernas a energia é um dos fatores que condiciona o desenvolvimento económico, os transportes, o ambiente, as relações internacionais, a gestão de empresas, as famílias e o estado. As sucessivas crises petrolíferas têm demonstrado que são vetores potenciadores de verdadeiras crises económicas a nível mundial. À medida que o tempo voa as atuais reservas petrolíferas com valor económico, ditas de fácil acesso, começam a escassear, levando à redução da oferta e consequentemente ao aumento do preço por barril de crude.

Com isto quer-se chegar à realidade “inconveniente” que esses efeitos causam, nomeadamente quanto ao nível dos impactes ambientais (desde derrames de crude até às alterações climáticas) e também as preocupações ligadas à racionalização do consumo de derivados do petróleo e afins.

Desta forma, é da responsabilidade de todos procurar fontes de energia limpas e sustentáveis. Portugal possui bastantes recursos naturais passíveis de serem utilizados como sistemas energéticos, ao nível das energias renováveis. Por exemplo o caso dos sistemas de energia solar, renováveis e limpos, são ainda hoje subaproveitados no nosso país.

Uma das várias aplicações possíveis para o Sol é a produção de eletricidade por via térmica, por meio de sistemas óticos e/ou refletores que através da concentração da energia solar permitem atingir temperaturas elevadas. Este tema tem sido alvo de estudos recentes, por parte de vários grupos I&D, tendo adquirido a denominação de energia solar térmica concentrada, em inglês Concentrated Solar Power, CSP.

O facto das energias renováveis ser uma área relativamente recente comporta ainda bastantes dúvidas sobre quais as tecnologias a escolher e/ou qual a melhor concretização para cada uma delas, no nosso espaço geográfico. No entanto, enquanto Portugal não elaborar e incentivar estes projetos de tecnologia CSP, apenas verá o resultado na vizinha Espanha. Onde os esforços das políticas de incentivo às energias renováveis, nomeadamente a atribuição de tarifas bonificadas à Energia Solar de Concentração, começam a produzir resultados, como mostra a figura seguinte.

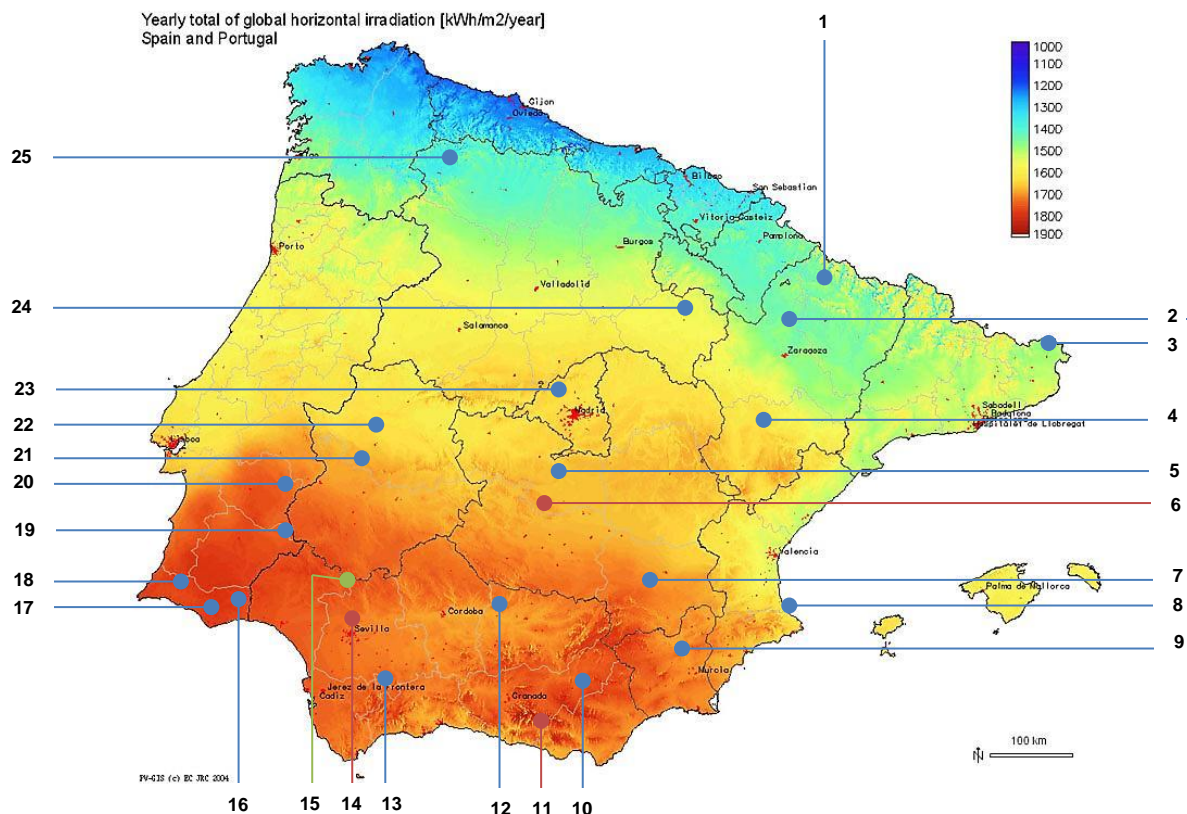


Fig. 1 Projetos CSP em desenvolvimento (azul), em construção (vermelho) e em operação (verde) na península ibérica. [17] [18]

Este trabalho, insere-se num projeto I&DT realizado pelo LINE.IPT (Laboratório de inovação industrial e empresarial, do Instituto Politécnico de Tomar), para uma empresa da região, no âmbito de um Vale I&DT.

Neste sentido, a agregação do *know-how* gerado em projetos realizados no Instituto Politécnico de Tomar, chega agora a um novo patamar. Um patamar que procurará integrar este género de tecnologias CSP no desenvolvimento de uma casa autossustentável.

1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE INVESTIGAÇÃO

O âmbito desta dissertação como o próprio título indica, passa pela pesquisa de um assunto pertinente e de interesse geral que é a termoelectricidade solar. É sobre este tema atual que se pretende desenvolver, de acordo com o interesse do investigador, um protótipo de um concentrador inovador do tipo Linear Fresnel Reflector.

O objetivo genérico, como já foi supra mencionado, é desenvolver um produto final, com o qual se espera despertar a atenção dos vários intervenientes do mercado das energias renováveis, mais em concreto do segmento da habitação sustentável.

Este é o propósito que o projeto visa atingir a longo prazo, ultrapassando inclusive o tempo de duração desta dissertação.

Os objetivos específicos que o projeto visa atingir são:

- a) a revisão crítica da literatura sobre tecnologias termoeletricas;
- b) teste pratico de hipoteses;
- c) simulacao e calculo de variaveis criticas;
- d) dimensionamento do sistema concentrador solar;
- e) elaboracao do prototipo LFR;
- f) testes de robustez e funcionamento ao sistema, atraves de testes em ambiente real.

Os objetivos principais podem ser agregados em dois fundamentais, são eles: a comparacao do concentrador Disco Parabólico com o concentrador Fresnel linear e a criaçao de um modo de armazenamento direto de calor.

Este processo inicial de investigacao procura estruturar o conhecimento, tendo como objetivos cientificos conceber conhecimento e/ou validar alguma teoria. No presente caso, os calculos de heliotecnia e dimensionamento do sistema concentrador são confrontados com as teorias cientificas de varios autores e no final com os resultados praticos obtidos no ensaio experimental.

1.3 ESTRUTURA

No capítulo um é primeiramente abordada a definicao da energia. De seguida revista a evolucao crescente do consumo mundial de energia primaria, uma verdade que explica a necessidade de desenvolver fontes de energia mais limpas.

O capítulo dois desenvolve o estado da arte da energia solar concentrada, ou seja toda a sua evolucao desde o seu surgimento até ao nível de desenvolvimento atual, a dispersao geografica dos varios tipos de tecnologia e onde foram instaladas as primeiras centrais solares.

No terceiro capítulo é feita a exposicao clara da estrategia metodologica e a definicao pontual de alguns conceitos teoricos, indispensaveis na prosseguicao dos trabalhos.

O capítulo número quatro apresenta todos os resultados obtidos nos ensaios praticos realizados, ao concentrador linear e ao concentrador parabólico.

Juntamente com os resultados, está a analise dos dados que explica a validade dos dados face à metodologia utilizada e a relevancia em relacao aos objetivos.

O último capítulo dará contas quanto ao que foi feito, relativo aos objetivos iniciais. Os que não foram atingidos serão referidos, como também os que ainda poderão, no futuro ser definidos. Ou ainda a indicacao de novos rumos e abordagens em trabalhos futuros.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 A ENERGIA, O QUE É

Quantidade escalar que pode ser aumentada ou diminuída num sistema quando ele respetivamente recebe ou produz trabalho

Tradução de electropedia.org

No contexto mecânico, energia é a capacidade de fazer trabalho onde o trabalho é a ação de uma força que age sobre um objeto colocando-o em deslocamento. (...) Outras formas importantes de energia incluem a energia térmica, a energia nuclear, a energia eletromagnética e a energia gravítica.

A energia pode ser transformada de uma forma para outra. Por exemplo, uma turbina a vapor converte energia térmica em energia mecânica, um reator nuclear transforma a energia nuclear em energia térmica e uma célula fotovoltaica converte a energia eletromagnética em energia elétrica. O princípio físico da conservação da energia exige que não haja perda de energia em qualquer transformação de energia.

Tradução de Dictionary of Energy; Joseph Priest, Miami University of Ohio

Do ponto de vista científico, sempre que ocorre uma transformação físico-química acontece uma libertação e/ou absorção de energia, que pode ser ou não usada de forma útil.

Por exemplo, a combustão de madeira liberta energia, sobretudo sob a forma de calor. Esta energia calorífica deve depois ser aproveitada no aquecimento útil de uma casa, por exemplo. Ao longo deste processo, observa-se que a alteração da composição química da madeira origina novos produtos, entre eles, carvão e cinzas.

Toma-se como válido afirmar que a biomassa se trata de um combustível de origem solar. Porque, das plantas resulta a madeira (biomassa) que por sua vez, quando utilizada como combustível, se transforma em carvão de origem antropogénica (carvão vegetal).

Ao analisar com mais atenção o exemplo anterior, é perceptível que a energia captada nas folhas é convertida pela clorofila e posteriormente armazenada em toda a planta, mais particularmente no caule. São estas reservas que vão ajudar a planta a crescer, para depois no final da sua vida decomporem-se a formarem novamente em biomassa.

Se no exemplo anteriormente citado, em vez do uso de biomassa como combustível, for utilizado carvão (carvão mineral), petróleo ou gás natural, estaremos igualmente a consumir um combustível

de origem solar. Pois, estes não deixam de ser subprodutos diretos ou indiretos da **fotossíntese**¹ de plantas, mas de plantas de outras eras geológicas.

De acordo com a teoria biogénica, os combustíveis petrogénicos são formados a partir da deposição, decomposição e gaseificação de matéria orgânica, sendo por esta razão considerados de origem fóssil.

Estes combustíveis de origem fóssil são hoje extraídos diariamente de poços e jazidas a um ritmo muito superior à sua taxa de recuperação natural. É devido a este facto que estes não são considerados fontes de energia renovável. Sendo que, fontes de energia renovável são as energias que dependem de recursos inesgotáveis, como por exemplo o sol, a água, a terra e o vento.

2.1.1 Disponibilidade e evolução do consumo mundial de energia primária

Para satisfazer as necessidades de desenvolvimento humano a procura mundial de energia tem aumentado progressivamente. Só no ano de 2010 aumentou cerca de 5,6%, revelando-se o maior crescimento desde 1985. Este aumento sem precedentes deve-se também ao facto de em 2009 existir um ligeiro declínio de 1,1%, que por sinal se revela a revisão mais baixa, como indica a figura 2..

Exceto estas oscilações pontuais, ocorridas em 2009 e 2010. É possível concluir com base nos dados e previsões da Agência Internacional de Energia que o petróleo continua a ser o combustível predominante (cerca de 33,6% do total mundial), ainda que o seu consumo tenda a diminuir no futuro, devido ao atual contexto socioeconómico.

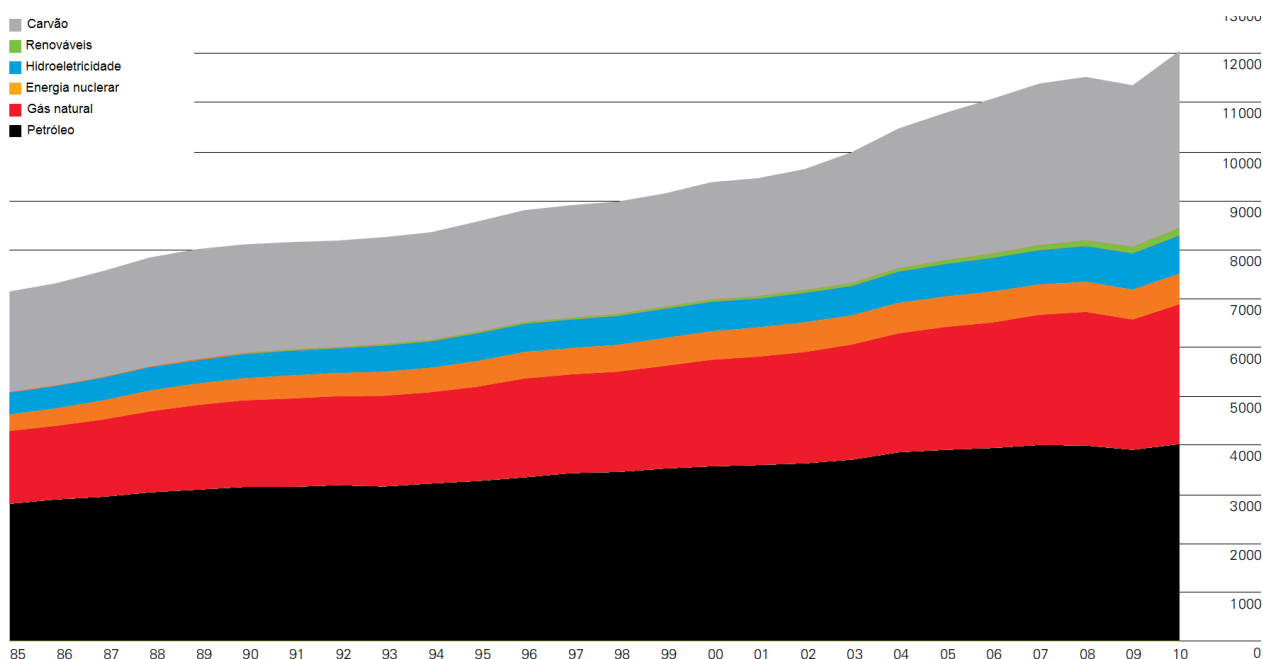


Fig. 2 Gráfico do consumo mundial de energia primária de 1985 até 2010, em Mtoe-
Million tonnes oil equivalent, adaptado de BP [13]

¹ **Fotossíntese** - conversão da energia solar em energia química, graças a uma enzima denominada clorofila que dota as folhas das árvores com uma pigmentação de cor verde. A energia fica depois armazenada na forma de açúcares compostos (glicose), formando estruturas rígidas (biopolímeros) como a celulose, hemicelulose e lenhina.

Ao reconhecer que o consumo global de energia continuará a aumentar nas próximas décadas e sabendo de antemão que novas fontes de energia, como as fontes de energia renovável, não substituem as tradicionais. Torna-se evidente que mais cedo ou mais tarde irá ocorrer um aumento do consumo de carvão, seguindo-se um aumento do consumo de gás natural, de modo a compensar o declínio registado no uso de derivados do petróleo.

Segundo a análise de outros gráficos que projetam a evolução das reservas mundiais de recursos naturais nas próximas décadas (ver Fig. 3) é possível prever que a oferta de combustíveis fósseis atingirá um pico nos próximos anos e que a procura destes recursos fósseis tenderá a acompanhar este mesmo pico.

Há assim, portanto, uma contradição entre a procura e a disponibilidade de recursos fósseis. Que deste modo sugere a necessidade de apostar em fontes de energia mais limpas e de fácil acesso, como as fontes de energia renovável, por forma a colmatar o constante aumento de procura de energia.

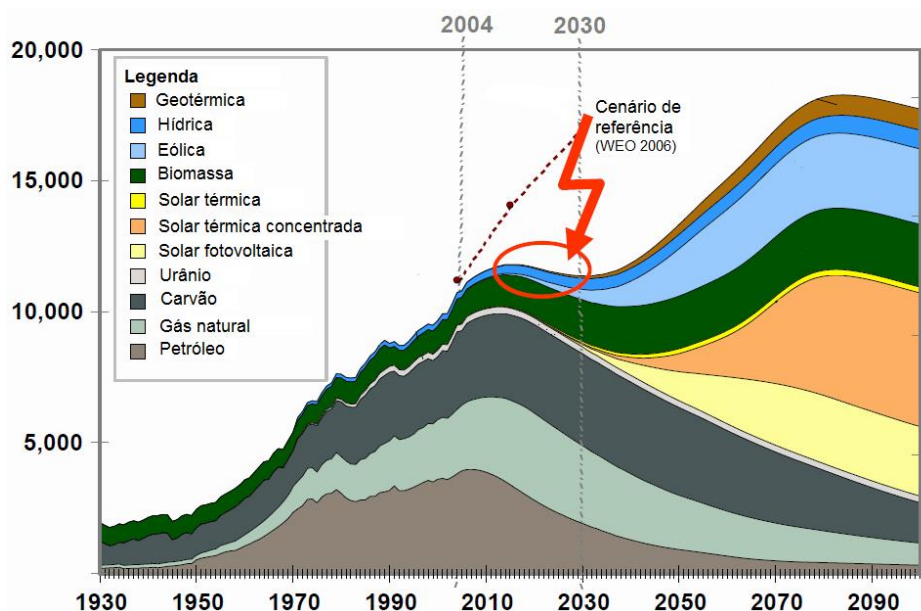


Fig. 3 Gráfico das disponibilidades de energia primária, em Mtoe-Million tonnes oil equivalent, adaptado de LBST [14]

Recapitulando o que foi apresentado nesta secção:

Torna-se evidente que a energia solar constitui a uma das principais causas de todos os processos físico-químicos que ocorrem na Terra e que a dependência de combustíveis fósseis tenderá a diminuir por imposição da sua escassez.

Em detrimento da afirmação anterior coloca-se a pergunta seguinte: Haverá espaço para as energias renováveis no atual contexto energético e seremos nós capazes de tirar partido das suas inúmeras potencialidades?

Veremos no subcapítulo seguinte de que forma a energia solar pode contribuir para uma potencial alteração ao cenário energético atual.

2.2 ENERGIA SOLAR

O Sol em números: Barlev, Vidu e Stroeve [8] referem que o Sol é a maior fonte de energia “carbono-neutro” ao nosso alcance, em apenas 1 h fornece mais energia do que toda aquela que é consumida no planeta durante um ano. Em números exatos, a Terra recebe uma impressionante quantidade de energia, estimada em cerca de 3×10^{24} J por ano, isto é o equivalente a 10.000 vezes mais que o consumo atual de toda a população mundial.

Logo, torna-se evidente que o recurso solar para além de ser uma fonte de energia disponível em abundância é também uma fonte livre de poluição. Motivos suficientes para a energia solar fazer parte da solução dos problemas socioeconómicos e ambientais que o constante consumo de combustíveis fósseis traz à sociedade em geral.

Porém para que a energia solar se torne na principal alternativa aos combustíveis fósseis é necessário inverter o atual paradigma de que são necessários combustíveis para produzir eletricidade. Desta forma, o caminho a seguir passa pelo desenvolvimento de sistemas mais eficientes, que poderão ser de conversão direta das ondas eletromagnéticas, provenientes do Sol.

Este capítulo pretende englobar as várias possibilidades de conversão da energia solar e como é subjacente ao título desta dissertação e apresentar com maior detalhe as que são do foro da energia solar térmica.

Posteriormente, no contexto da energia solar térmica, são apresentadas as várias tecnologias, pelo seu grau de concentração solar, onde será dado especial relevo à de alta concentração.

Por fim, para cada tecnologia de alta concentração solar, será apresentada a sua evolução histórica, a descrição de cada sistema de alta concentração e realizada a comparação entre cada um dos sistemas referidos.

2.2.1 Tecnologias de conversão solar

Quando se aborda a temática de energia solar, destacam-se duas tecnologias predominantes, a fotovoltaica e a solar térmica.

A primeira é capaz de gerar eletricidade diretamente a partir da energia solar. Esta conversão de energia solar embora tenha atingido para já o patamar de sucesso comercial, não é totalmente eficiente. Porque envolve primeiro a transferência de energia dos fótons da radiação incidente para os elétrons da estrutura atômica do material semicondutor e só depois a condução da carga elétrica para consumo ou armazenamento em baterias. Devido aos efeitos quânticos, apenas algumas frequências de radiação estão envolvidas nestas trocas, com rejeição das outras. Por isso, a conversão fotovoltaica tem baixo rendimento, o que significa que os painéis fotovoltaicos por si só, não representam um meio eficaz de produção de energia elétrica de origem renovável.

A segunda, abrange três tipos de conversão de energia:

- a) de radiação para calor;
- b) de calor para energia mecânica e
- c) de energia mecânica para eletricidade.

Sendo que, a tecnologia de conversão solar térmica mais comum é a que converte a radiação solar diretamente em calor. Como por exemplo os vulgares coletores planos (*Flat Plate Collectors*, FPC), os quais não atingem temperaturas superiores a 60 °C e têm como propósito o aquecimento de águas para uso doméstico, como é exemplo as águas quentes sanitárias.

Nesta gama de coletores, onde regra geral todos são estacionários, referência para os coletores de tubos de vácuo (*Evacuated Tube Collectors*, ETC) que atingem temperaturas de operação de aproximadamente 100 °C [6]. A mesma categoria inclui ainda o coletor parabólico composto (*Compound Parabolic Collector*, CPC) (ver Fig. 4 e tabela1)

Tabela 1 Vários tipos de coletores solares térmicos [6]

Movimento	Tipo de coletor (Recetor)	Tipo de concentração (Absorvor)	Rácio de concentração	Intervalo de temperatura (°C)
Estacionário	Flat plate collector (FPC)	Plano	1	30-80
	Evacuated tube collector (ETC)	Tubular	1	50-200
	Compound parabolic collector (CPC)	Tubular	1-5	60-240
Seguidor de um eixo	Linear Fresnel reflector (LFR)	Tubular	10-40	60-250
	Parabolic trough collector (PTC)	Tubular	15-45	60-300
	Cylindrical trough collector (CTC)	Tubular	10-50	60-300
Seguidor de dois eixos	Parabolic dish reflector (PDR)	Pontual	100-1000	100-500
	Heliostat field collector (HFC)	Pontual	100-1500	150-2000

Porém, na última década, surge a combinação entre os sistemas solares elétrico (*Photo Voltaic*, PV) e térmico (*Thermal*, T). São os ditos painéis híbridos: PV/T. Visível na figura 4.

Estes painéis híbridos assemelham-se ao funcionamento de um permutador de calor, pois o calor dissipado pelas células fotovoltaicas é transferido para um meio líquido ou gasoso arrefecendo a temperatura de operação das células PV e tornando-as mais eficientes. O fluido térmico é depois armazenado em depósitos de inércia, ou imediatamente consumido em aplicações que requeiram o pré-aquecimento de água.

Esta nova tecnologia aumenta não só o rendimento do painel PV, o que permite um retorno mais rápido do investimento inicial, mas também abre novas perspetivas na integração de sistemas renováveis em edifícios, onde até agora, por razões arquitetónicas não era possível instalar ambos os sistemas.

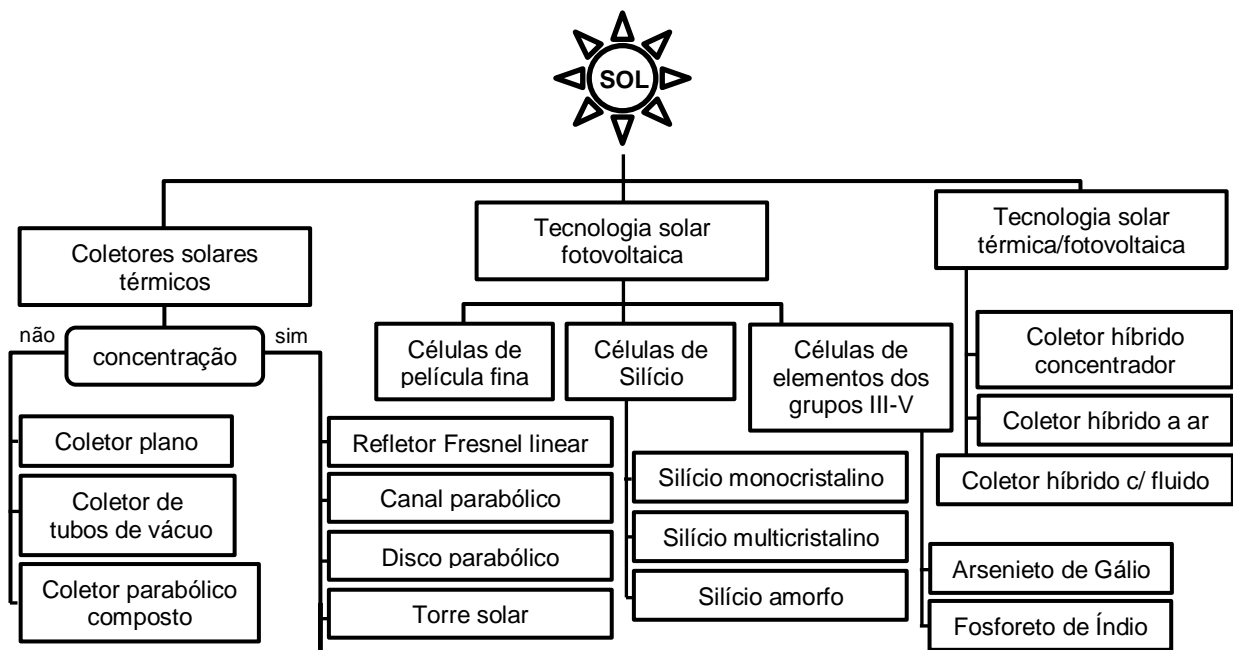


Fig. 4 Classificação dos vários tipos de coletores solares. Adaptado de [6]

Para além dos painéis solares térmicos estacionários ou não concentradores, já indicados anteriormente, temos também os coletores de concentração solar que seguem o movimento do sol ao longo do dia, por meio de motores [6] [8].

Deste modo os coletores solares térmicos de concentração (fotovoltaicos de concentração também) caracterizam-se segundo a capacidade de seguimento do Sol e respetivo rácio de concentração. Este parâmetro é a razão entre a radiação que incide no recetor devido ao concentrador e que incidiria sem o concentrador; este conceito será mais desenvolvido no parágrafo 3.5.3.

Como se comprova com os dados apresentados na Tabela 1 estes dois fatores estão intimamente relacionados com a gama de temperatura que pode ser atingida, em condições de operação normal.

Portanto os coletores estacionários, desprovidos de dispositivos de concentração, aquecem a água à temperatura de máxima de 100 °C. Este é o limite convencionado para as aplicações de “baixas” temperaturas.

Rácios de concentração na ordem das dezenas, correspondem a temperaturas “médias” entre os 100 °C e os 250 °C, onde se enquadram as aplicações de poligeração, armazenamento e processos industriais de esterilização a vapor, ou selagem a vácuo.

As “altas” temperaturas ultrapassam os 250 °C e considera a produção de vapor (Rankine), fusão/sublimação de materiais e a produção de combustíveis solares como por exemplo o hidrogénio.

2.3 ENERGIA SOLAR DE CONCENTRAÇÃO

Os coletores de concentração solar produzem altas temperaturas através de espelhos ou lentes para concentrar a luz solar num ponto ou numa linha. São geralmente utilizados para produção de energia elétrica, mas também são utilizados em processos de dessalinização de água salobra. Em locais remotos são empregados na eletrificação de minas; na irrigação agrícola e em fábricas de cimento e de tijolo cerâmico [7].

A principal vantagem da energia elétrica gerada pela tecnologia solar termoeleétrica de concentração é o facto de apresentar rendimentos mais elevados em comparação com a tecnologia fotovoltaica, inclusive face à tecnologia de concentração fotovoltaica (*Concentrated Photo Voltaic*, CPV).

A tecnologia CPV, para além de usar igualmente lentes ou espelhos para focar os raios numa pequena área de material semicondutor e assim aumentar o rendimento, apresenta apenas a vantagem de reduzir a utilização de material semicondutor, mas comporta a desvantagem de ser bastante cara, uma vez que são necessários equipamentos de focagem e sistemas de seguimento e arrefecimento solar.

Aplicações da energia solar concentrada

A busca por uma economia neutra ao carbono é um dos principais objetivos do protocolo de Kioto para a mitigação das alterações climáticas. No futuro, espera-se que a energia solar de concentração contribua ativamente para a síntese de combustíveis solares, como por exemplo o hidrogénio e o gás de síntese (*syngas*).

Neste contexto é importante a realização de testes que conduzam à produção de hidrogénio através da termólise e ciclo termoquímico, bem como através de eletrólise, com origem em fontes de energia solar. Acontece que, as principais barreiras à implementação de soluções baseadas no Hidrogénio, são o seu armazenamento e distribuição em condições de segurança.

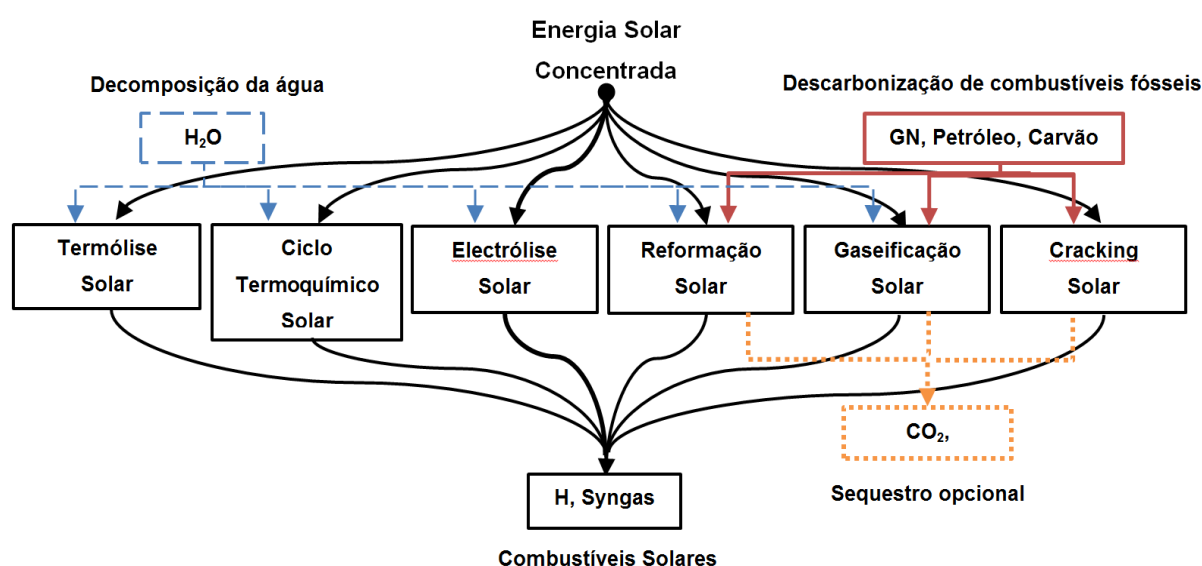


Fig. 5 Processos químicos de produção de hidrogénio, via CSP. Adaptado de [1]

De todas as alternativas para a síntese de hidrogénio, apresentadas na figura anterior (Fig. 5), a conversão da energia solar em hidrogénio por via da eletrólise (eletricidade proveniente de tecnologias de concentração termoeleétrica), configura-se como a melhor solução para a produção deste combustível solar. Isto porque se apresenta como um ciclo totalmente renovável e com zero emissões de dióxido de carbono.

A finalidade das tecnologias de concentração solar vão para além de converter a radiação solar em calor. As tecnologias de alta concentração compreendem ainda a conversão de calor em energia mecânica e de energia mecânica em eletricidade. Este tópico será explorado, no título: “tecnologias de energia solar térmica de concentração”.

O caso particular da energia solar concentrada termoeleétrica, para obtenção de vapor tem uma importância significativa pela sua capacidade de produção de eletricidade, uma vez que se pode associar o ciclo termodinâmico de Rankine habitual nas centrais termoeleétricas.

Desta forma, uma central solar termoeleétrica pode implementar o mesmo princípio tecnológico, mas substituindo a queima de combustíveis fósseis parcialmente ou totalmente por “calor” solar.

Reúne-se assim o melhor de duas tecnologias: a utilização de uma fonte energética abundante, limpa e cuja captação é feita recorrendo a sistemas seguros, sobre um sistema termodinâmico bastante conhecido e explorado pelas entidades ligadas ao sector energético não oferecendo, grandes dificuldades de conceção, construção e manutenção.

Diversas tecnologias surgiram como forma de produção de eletricidade através do solar térmico:

- a) Refletores Lineares de Fresnel / Linear Fresnel Reflector, LFR
- b) Canal Parabólico / Parabolic Trough Collector, PTC)
- c) Disco Parabólico / Parabolic Dish Reflector, PDR
- d) Torre Solar / Heliostat Field Collector, HFC
- e) Chaminé Solar
- f) Lago solar de gradiente salino.

Porém, as duas últimas (chaminé solar e lago salino) têm pouca expressão na geração de eletricidade, este motivo aliado à grande ocupação de área, foram razões suficientes para que as experiências levadas a cabo tenham sido abandonadas.

Assim as tecnologias solares que atualmente existem para a produção de eletricidade, são os Refletores Lineares de Fresnel (*Linear Fresnel Reflector*, LFR) e Canal Parabólico (*Parabolic Trough Collector* PTC), mais usuais devido à sua simplicidade na instalação e menores custos associados. Para além das centrais de concentração linear existem também as tecnologias de concentração pontual: Disco Parabólico (*Parabolic Dish Reflector*, PDR) e Torre Solar (*Heliostat Field Collectors*, HFC).

2.3.2 História da energia solar de concentração

A mais antiga utilização da energia solar concentrada teria pretensamente sido o lendário uso, por Arquimedes, de raios solares refletidos por espelhos para incendiar os barcos da frota Romana, na batalha de Siracusa em 213 A.C. (o que não é confirmado por nenhum historiador coevo, sendo inicialmente uma especulação de Anthemius de Tralles, 700 anos depois).

Em 1515, Leonardo da Vinci idealizou e esboçou desenhos de vários concentradores solares. Seguiram-se outros como, Buffon, que em 1747 agregou 168 espelhos móveis para facilmente orientar a luz refletida.

Um pouco mais tarde quando decorria o ano de 1774 o famoso químico Lavoisier desenvolve o primeiro forno solar, com o qual atingiu uma temperatura superior a 1700 °C num tubo de ensaio para calcinação de metais [2].

Um século após as primeiras experiências, iniciam-se as primeiras tentativas de geração elétrica com origem na concentração dos raios solares. A primeira e bem-sucedida ocorreu em 1870 e foi levada a cabo pelo engenheiro Sueco-Americano John Ericsson, que pôs em prática a construção de um coletor cilindro parabólico (PTC) que entregava vapor diretamente a um pequeno gerador de 373 W. Porém nem ele, nem os seus sucessores superaram o preço imbatível do carvão, proveniente da revolução industrial Inglesa. E acabariam por abandonar as suas experiências por falta de apoios.

No ano de 1878, o francês Augustin Mouchot (1825-1912), mostra na Exposição Internacional de Paris, o seu invento para produzir gelo. Anos depois, a sua invenção inspira o seu assistente Abel Pifre na criação de um concentrador para fins industriais. Ver Fig. 6.

Destaque para o português Manuel Gomes, ou padre Himalaya (1868-1932) após a construção do quarto aparelho de concentração, conseguiu obter a temperatura de 3500 °C. Foi depois apresentado e medalhado em 1904 na Exposição Internacional de St. Louis, Missouri, EUA). Ver Fig 7.

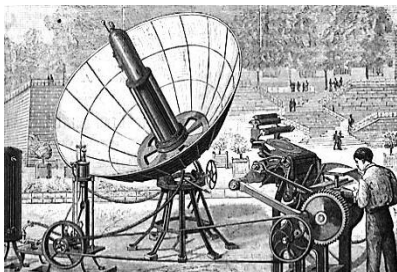


Fig. 6 Disco parabólico de Abel Pifre (1852-1928), que em 1881 utilizou para accionar uma máquina de prensa gráfica [26].



Fig. 7 "Pirelióforo" do Padre Himalaya, com uma superfície refletora de 80 m², formado por 6177 espelhos [3].

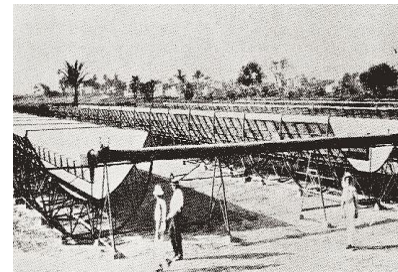


Fig. 8 Colectores solares de Shuman, localizados em Al Meadi, Egito.

Em inícios do século XX foram construídos os primeiros campos solares. Em 1911, Frank Schuman (1862-1918) fundou a companhia “Sun Power Co” e logo, na sua cidade natal Tacony, EUA criou uma central solar de 20 kW e logo no ano seguinte construiu no Egipto uma central com 5 espelhos parabólicos, que gerava vapor para uma bomba de irrigação de 73 kW, com um caudal de 2000 m³/h. Ver figura anterior, Fig. 8, [9].

A partir de meados do século XX, surgiram mais instalações de teste e demonstração: Coolidge (EUA); Sunshine (Japão); IEA-DCS (Espanha) e STEP-100 (Austrália).

Mais tarde a Luz Company desenvolve nove centrais pioneiras, chamadas Sistemas Geradores a Energia Solar (*Solar Electricity Generating Systems*, SEGS) agrupados em 3 grandes campos solares, localizados no deserto Mojave, Califórnia. Foi assim que os EUA, tirando vantagens da economia de escala, deram os primeiros testes na comercialização da energia de concentração solar térmica (ver Tabela 2).

Tabela 2: Dados das 9 centrais comerciais SEGS [9]; [10]; [11]

Nome	SEGS I - II	SEGS III -VII	SEGS VII - IX
Localização	Daggett	Kramer Junction	Harper Lake
Capacidade nominal	14 + 30 MW	5x30 MW	2 x 80 MW
1º ano de operação	1984 - 1985	1986-1988	1989 - 1990
Eficiência anual	9,7-12,4%	10,7-12,3%	13,9%
Temperatura HTF	307-316°C	349-391°C	391°C
Investimento	3800-4500 \$/kW	3200-3800 \$/kW	2890 \$/kW
Custo de eletricidade	0,27-0,18 \$/kWh	0,18 – 0,12 \$/kWh	0,14-0,11 \$/kWh
Produção anual	30 GWh/a +80 GWh/a	5 x 92 GWh/a	2 x 250 GWh/a
Área	29 + 63 (ha)	2x80+87+66+68 (ha)	162 + 169 (ha)

As centrais SEGS X, XI e XII inicialmente projetadas não chegaram a ser construídas, a sua construção fracassou devido à combinação de vários fatores, no entanto é importante realçar a sua total operacionalidade até hoje com um custo de manutenção e operação residuais, empregando cerca de uma centena de pessoas.

Ainda na Califórnia, foi edificada a primeira torre solar com o apoio do Departamento da Energia dos Estados Unidos (Department of Energy, DoE). Um total de 1818 helióstatos, com a capacidade nominal de 10 MW. Foi concluída em 1981 e operou entre 1982 e 1985. Altura em que a até então Solar One, sofre uma atualização e é convertida na Solar Two.

À Solar One são adicionados mais 108 espelhos de maiores dimensões, equipados com seguidores. Outra alteração foi o uso de “sal fundido”, uma combinação de 60 % nitrato de sódio com 40 % nitrato de potássio, o que possibilitou o armazenamento de energia solar, durante a noite ou quando o céu estava nublado, ao contrário do que acontecia com a central Solar One em que no seu recetor preto,

situado no topo da torre, transferia o calor para um fluido (um óleo) de transferência de calor. Este óleo quente era depois utilizado para aquecer água e gerar vapor.

A 24 de Novembro de 2009, após dez anos de inatividade a torre solar é demolida, sendo que os seus promotores afirmam que tecnologia passou nos testes e está finalmente aprovada para entrar no mercado.

Um exemplo vivo do intercâmbio de conhecimento entre Estados Unidos e Espanha é a central “Solar Tres” mais tarde rebatizada “Gemasolar”, a qual implementa o mesmo conceito que a sua congénere americana, mas com um campo de helióstatos três vezes maior, possui 2650 espelhos e uma capacidade nominal de 19,9 MW, apoiada no mais avançado sistema de armazenamento térmico de 15 h. A sua integração na rede elétrica espanhola foi realizada a Outubro de 2011.

Assiste-se assim uma transferência clara de *know-how* dos Estados Unidos da América para Espanha, colocando-a na vanguarda das tecnologias de energia solar concentrada. Assumindo a partir de 2010 a liderança mundial de capacidade instalada, à frente dos Estados Unidos da América.

Em anexo apresenta-se a Tabela 8 Lista de centrais CSP [\[22\]](#)

2.4 TECNOLOGIAS DE ENERGIA SOLAR TÉRMICA DE CONCENTRAÇÃO

Após uma breve ressalva histórica, destaque agora para as quatro tecnologias dominantes no domínio da energia solar termoelétrica de concentração, (CSP).

2.4.1 Canal parabólico

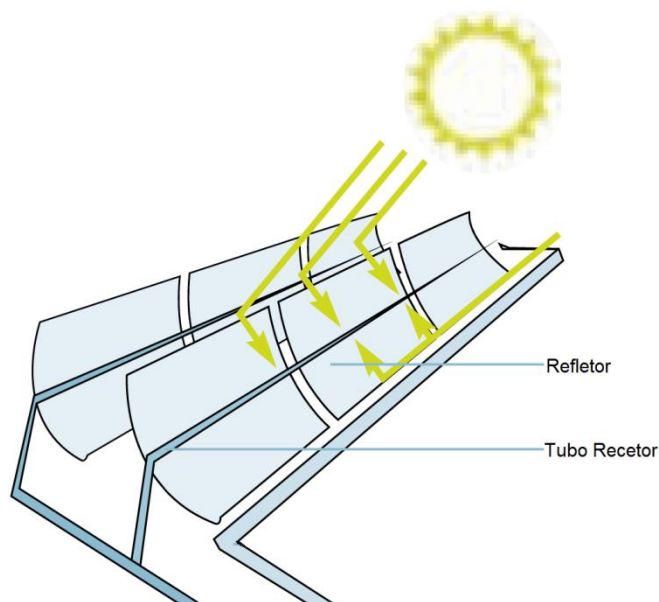


Fig. 9 Ilustração do conceito canal/cilindro parabólico, adaptado de [12]

O mercado mundial é dominado por centrais do tipo cilindro parabólico, que respondem a 88-90% de toda a capacidade instalada. Contribuindo para que esta seja a tecnologia de concentração solar mais madura.

Os sistemas de canal cilindro/parabólico utilizam espelhos refletores com uma forma cilíndrica/parabólica para concentrar a radiação solar, num tubo recetor, onde a energia é transferida para um líquido de transferência de calor (*Heat Transfer Fluid*, HTF) podendo ser um óleo sintético, em certos casos uma mistura de óxido de bifenil e difenil.

O líquido de transferência de calor vai transportar esta energia térmica pelo elemento coletor de calor (*Heat Collector Element*, HCE) até ao permutador onde vai trocar essa energia com a água de alimentação proveniente do ciclo da central.

Habitualmente este tipo de concentrador solar encontra-se integrado numa central a gás de Ciclo Combinado.

Os sistemas solares integrados com ciclo combinado (*Integrated Solar Combined Cycle Systems*, ISCCS) utilizam o calor gerado pelos coletores solares como suplemento ao calor desperdiçado na turbina a gás, por forma a aumentar a capacidade de produção de vapor no ciclo de Rankine.

Estes sistemas, são normalmente projetados para serem instalados com o seu eixo segundo uma orientação Norte-Sul e efetuam o seguimento do Sol num só eixo, segundo a direção Este-Oeste.

2.4.2 Fresnel linear

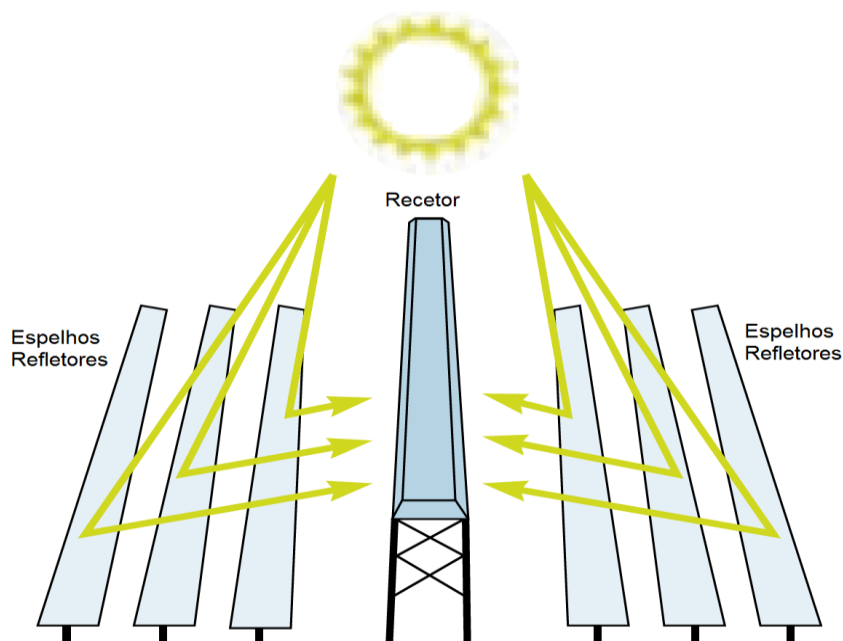


Fig. 10 Ilustração do conceito Fresnel linear, adaptado de [12]

O conceito que está por de trás deste sistema pouco difere do anterior. Aliás a diferença do sistema LFR, está nos vários espelhos planos ou ligeiramente curvados, que tendo por base o princípio das lentes de Fresnel recriam virtualmente o perfil de uma parábola.

O absorvedor tubular localiza-se na mediatriz do campo de espelhos planos e acima destes. A separação física entre o recetor (espelhos) e absorvedor, não exige um sistema de controlo muito complexo, tornando assim a reflexão mais simples e precisa.

Por outro lado, o tubo absorvedor afigura-se como uma desvantagem, pois, durante o dia, vai projetar uma sombra indesejada sobre os espelhos.

Neste sistema uma das vantagens é o baixo custo dos espelhos planos comparativamente aos espelhos de canal parabólico e, claro, como foi referido, o facto do controlo ser mais simples e por conseguinte mais barato.

Vários estudos enumeram outros benefícios, como por exemplo: ao longo do dia o sistema LFR serve de proteção solar contra o sol abrasador dos ambientes áridos, oferecendo sombra a reservas de água e a áreas de cultivo ou pastagem, já durante a noite e com os espelhos na posição horizontal é oferecida proteção contra as temperaturas negativas.

Uma outra desvantagem é o sombreamento entre os espelhos à medida que o Sol se move ao longo do dia. Para eliminar esta falha, do sistema, surge recentemente uma variante ao LFR, o CLFR.

2.4.3 Fresnel linear compacto

O refletor Fresnel linear compacto ou em inglês Compact Linear Fresnel Reflector, é um sistema em quase tudo semelhante ao LRF, mas com a diferença de haver múltiplos recetores lineares

potenciando a existência de mais fileiras de espelhos planos mais próximas entre si, orientadas alternadamente para um determinado tubo absorvedor.

A vantagem adicional deste tipo de configuração tem a ver com um melhor aproveitamento da superfície refletora, nos períodos do nascer do sol e pôr-do-sol.

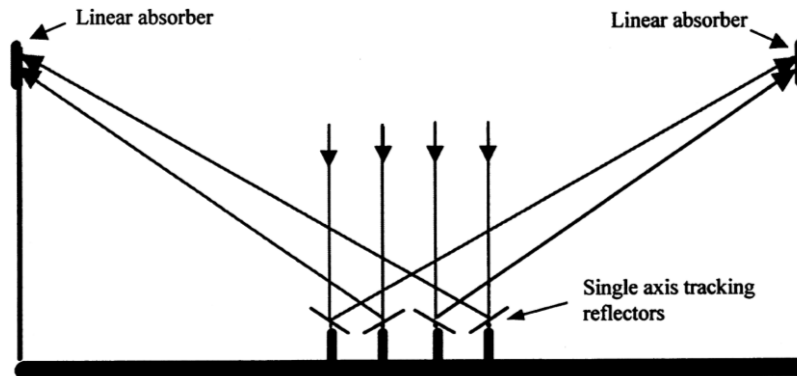


Fig. 11 Ilustração do conceito CLRF, representando a ausência de sombras entre espelhos [4]

2.4.4 Disco parabólico

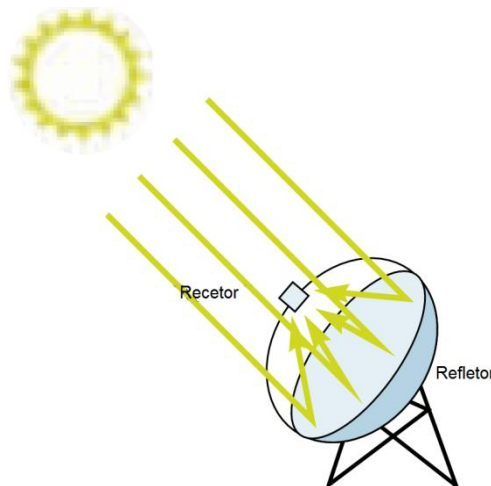


Fig. 12 Ilustração do conceito disco-parabólico, adaptado de [12]

O refletor é formado por vários segmentos de espelhos curvos, de modo, que no seu todo, formem um disco de forma parabólica.

Este género de sistema, geralmente possui no seu ponto focal um motor Stirling, que converte o calor presente no seu ciclo térmico em energia mecânica que aciona um gerador elétrico clássico, produzindo energia elétrica.

Devido ao seu tamanho ser menor relativamente do que os restantes concentradores solares, tornam-se por estas razões, mais apropriados para produção elétrica descentralizada em regiões mais remotas.

O grande inconveniente destes sistemas, é requererem um controlo exato do disco recetor com a posição do Sol, para que a concentração seja constante no ponto focal.

Mas, se o propósito do promotor do projeto de concentração solar é a geração de termoeletricidade em grande escala então, são habitualmente ligados termicamente em série formando uma central solar. Neste modelo de ligação o fluido de transferência de calor é recolhido em cada coletor e direcionado para uma central elétrica, onde é acionada uma turbina a vapor.

É importante ter em conta, o propósito a que se destinam, quer seja a produção individual ou centralizada, neste tipo de sistemas o armazenamento de calor não pode ser aplicado.

2.4.5 Torre solar

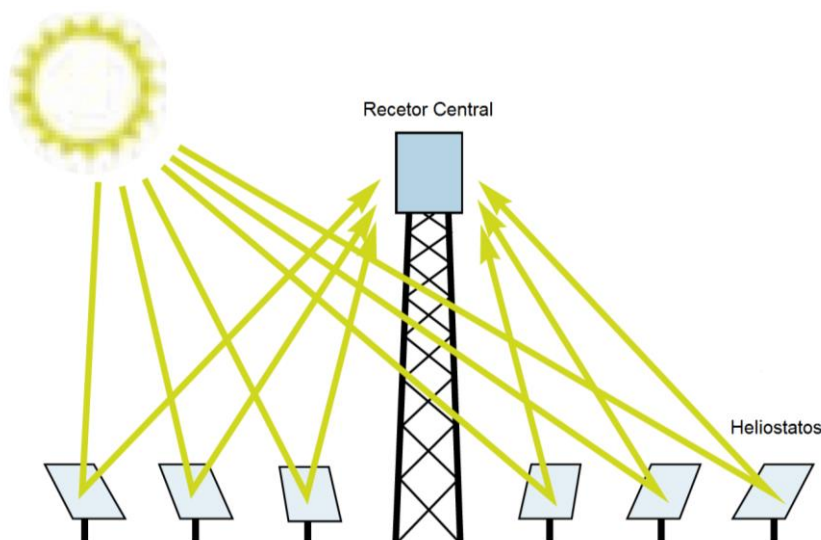


Fig. 13 Ilustração do conceito torre solar, adaptado de [12]

Esta tecnologia de conversão é o expoente máximo da Energia Solar Concentrada, atingindo potências de 10 a 50 MW, também é usualmente chamada torre de concentração.

Emprega o uso de espelhos planos de grandes dimensões com cerca de 100m² denominados helióstatos que são orientados segundo dois eixos.

Estes helióstatos refletem a luz solar e concentram-na, todos, num ponto localizado no topo de uma torre. Devido à irradiação aí concentrada é aquecido um fluido até à temperatura de 500 - 600 °C, que sob a forma de vapor crítico é conduzido para uma turbina a vapor acoplada a um gerador produzindo energia elétrica ou em alternativa o fluido aquecido pode ser armazenado em depósitos de sais fundidos ou de cimento.

O uso do solo é ligeiramente menos eficaz no caso das centrais de torre solar, mas, como vantagem a eficiência da conversão global sobe até 20%, que pode ser obtida através da elevação da temperatura do fluido de trabalho, através da hibridização; este conceito será mais desenvolvido no parágrafo 2.6.

Comparação entre tecnologias

Estes sistemas que foram enumerados possuem quatro características em comum, todos eles necessitam de um concentrador/refletor, de um recetor e de um fluido de trabalho que transporte e armazene o calor capturado, podendo este ser à base de água, ar ou óleo.

A principal diferença entre os vários sistemas está no rácio de concentração, isto é, o número de vezes que os espelhos ou lentes conseguem concentrar os raios de sol, o que, por conseguinte, leva a que cada sistema de concentração solar tenha a sua gama de temperaturas.

Tabela 3: Caracterização em função do tipo de recetor e de foco [12]

	Fresnel Linear	Cilindro Parabólico	Disco Parabólico	Torre Solar
Recetor	Fixo	Móvel	Móvel	Fixo
Foco de concentração	Linear	Linear	Pontual	Pontual
Eficiência ótica	*	**	***	**
Fluido de trabalho	Vapor	Óleo sintético	Hidrogénio ou Hélio	Sais fundidos
Temperatura de operação (°C)	270	390	750	565
Rendimento global	8-10%	10-16%	25-30%	20-35%
Espaço ocupado	Médio	Grande	Pequeno	Médio
Consumo de água (L/MWh)	3000	3000	Não consome	2000
Armazenamento	Sim	Sim	Depende da configuração da central	Depende da configuração da central
Funcionamento híbrido	Sim	Sim	Apenas em alguns casos	Sim
Estado Atual	Em início de comercialização	Em comercialização	Em fase de demonstração	Demonstração em larga escala, início de comercialização
Margem de evolução	Significativa	Limitada	Significativa	Muito significativa

2.5 ARMAZENAMENTO E HIBRIDIZAÇÃO

Com a interpretação a figura 14 percebe-se como é feito o projeto da central solar CSP com a inclusão de tanques de armazenamento. Nos períodos de maior radiação solar direta ou em inglês Direct Normal Irradiation, parte dessa radiação é armazenada. Assim a turbina de vapor vai trabalhar mais tempo perto da carga nominal mantendo o seu rendimento já que não é projetada para uma situação menos frequente ao longo do dia. Desta forma há um melhor aproveitamento de energia solar sem sobre dimensionar os equipamentos de conversão de energia em trabalho.

Por todo o mundo um número elevado de centrais termoelétricas, produzem eletricidade por via da queima de combustíveis fósseis, como o carvão e o fuel óleo. A integração de um campo solar com armazenamento térmico de forma a substituir parte da queima de combustíveis fósseis significa uma redução das emissões de gases poluentes e um aumento da eficiência da caldeira, visto que, quando a carga de funcionamento da caldeira diminui, a sua eficiência tende a aumentar.

Os sistemas de armazenamento térmico podem ser do tipo direto ou indireto. No caso direto, o meio de armazenamento é o próprio fluido de trabalho usado no campo solar. Por outro lado, no caso indireto, o fluido de trabalho é distinto do meio de armazenamento.

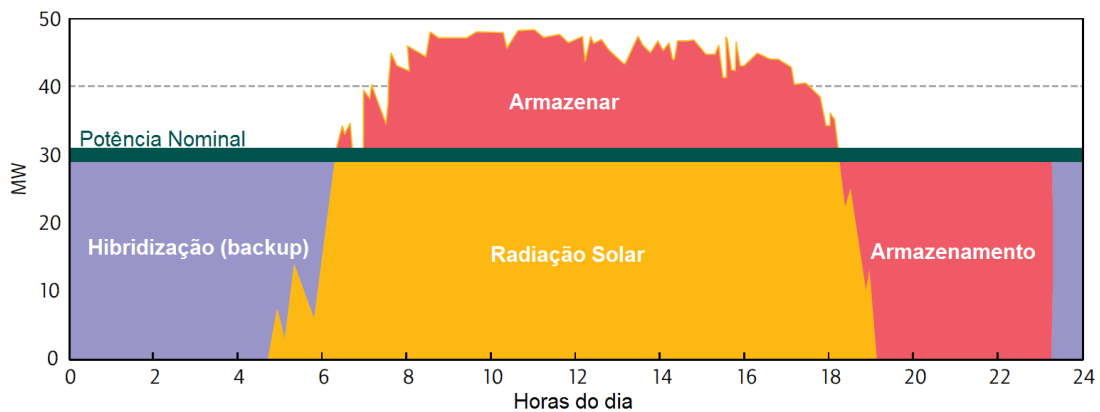


Fig. 14 Perfil típico de operação de uma central solar termoelétrica [12]

Em suma, no primeiro capítulo foi abordado o conceito de energia. De seguida revista a evolução crescente do consumo mundial de energia primária que explica a necessidade de desenvolver fontes de energia mais limpas.

São poucos os fenómenos naturais a nível global que de algum modo ocorrem sem a presença de energia solar. Senão vejamos, além da fotossíntese das plantas (biomassa), referida anteriormente; a água dos rios e albufeiras que resulta do ciclo da água (energia potencial hídrica); as correntes oceânicas (energia das ondas) e ventos (energia eólica). Em suma o Sol tem um elevado potencial, por via das fontes de energia renovável (FER), para satisfazer a demanda energética mundial de forma limpa e sustentável.

Como resultado da revisão bibliográfica é identificável uma linha de separação entre os vários temas sobre energia solar. Alguns autores defendem que os artigos que abordam a temática de transferência de calor, estão organizados de acordo com os seguintes assuntos: radiação solar, edifícios e aplicações de baixa e alta temperaturas.

Por outro lado, artigos científicos sobre energia fotovoltaica (exceto os que lidam com a integração em edifícios), energia eólica, aspetos arquitetónicos de edifícios e controlo de aquecimento ou arrefecimento não estão incluídos na temática da energia solar térmica.

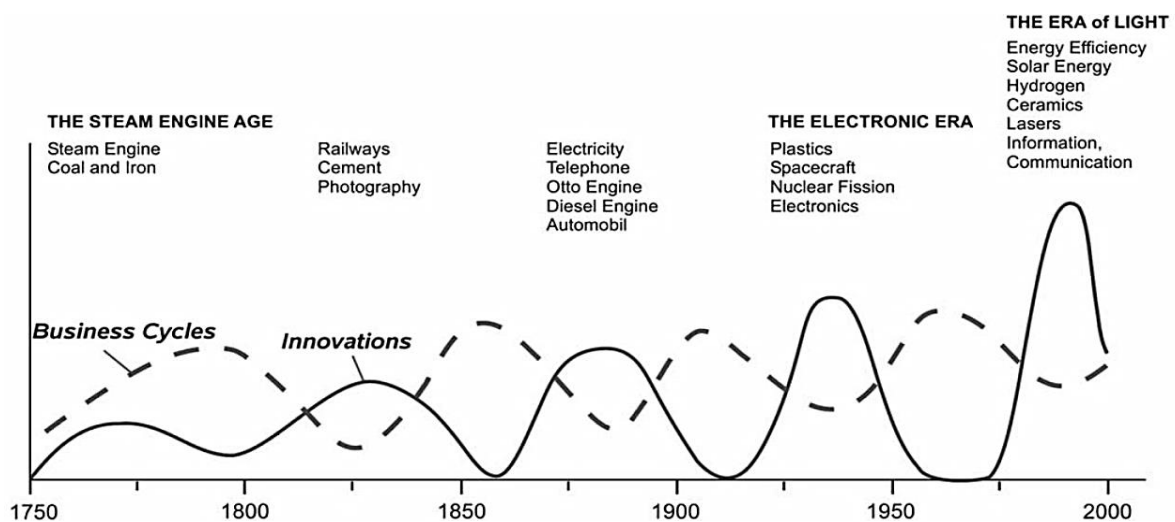


Fig. 15 Ciclos de progresso tecnológico e de crescimento económico mundial [19]

A figura 15 mostra que após cada fase de pesquisa e desenvolvimento tecnológico sucede-se um período de prosperidade, resultado da inovação científica.

Espera-se agora e à semelhança do que aconteceu no passado uma nova era de crescimento económico. Uma era dominada pela luz solar, nomeadamente a concentrada, uma vez que esta é mais eficiente que a energia fotovoltaica e mais ecológica que as tecnologias convencionais de geração elétrica.

3 MODELOS E MÉTODOS

O capítulo inicia-se com uma visão dos cálculos solares necessários para a orientação de um coletor solar genérico de concentração solar.

É descrito o modelo de dimensionamento e orientação dos espelhos refletores, discutida a comparação entre o valor da radiação solar estimada e o valor da temperatura expetável.

Por fim, serão descritos aqui no presente capítulo o modelo para estimativa da radiação e o modelo para estimação das perdas térmicas no recetor linear de cavidade trapezoidal.

3.1 CONCEITOS GERAIS DE HELIOTECNIA

A energia radiada pelo Sol é difundida para o espaço e parte dela atinge a superfície terrestre com uma intensidade de cerca de $1,367 \text{ kW/m}^2$, valor denominado de constante solar, E_0 .

Parte desta radiação solar, é refletida ou absorvida pela atmosfera, assim num dia de céu claro, ao meio-dia, é possível medir com recurso a um **piranómetro**² (Fig. 16) uma **insolação**³ de $1,000 \text{ kW/m}^2$, valor que convencionalmente corresponde à concentração de um Sol⁴.

A radiação que efetivamente atinge a um objeto divide-se em três componentes:

- a) **direta**: a que vem "diretamente" do sol, isto é, raios solares diretos;
- b) **difusa**: proveniente de todo o céu exceto do disco solar, por exemplo: nuvens e nevoeiro;
- c) **refletida**: resulta da reflexão do solo (albedo) e de objetos circundantes.

É assim importante lembrar que as tecnologias de concentração solar apenas utilizam apenas a componente direta da radiação solar (DNI). Logo, para a viabilização deste tipo de sistemas é importante que a sua implementação seja efetuada nas zonas geográficas que dispõem dos melhores recursos solares, como é o caso da região dos países do Norte de África e Médio Oriente (*Middle East and North Africa, MENA*).

Legenda:

- (1) Sensor de metal preto, gera uma tensão proporcional à irradiância.
- (2) Semi-esfera de vidro.
- (3) Semi-esfera de vidro. Limitam o comprimento de onda da radiação e fazem com que esta incida perpendicularmente no sensor (1).
- (4) Concha de metal branco.

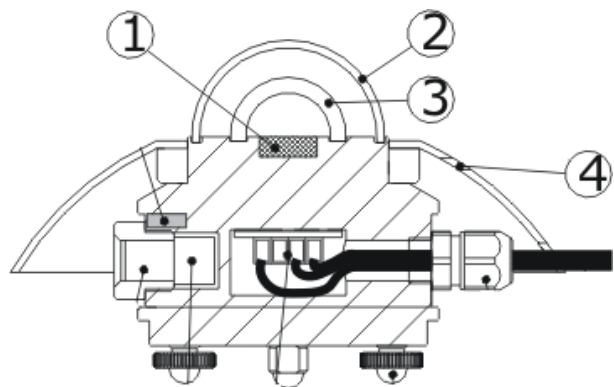


Fig. 16 Corte esquemático de um piranómetro [15]

² **Piranómetro**-Instrumento que mede a irradiância solar total num plano horizontal.

³ **Insolação**, o mesmo que Irradiância (kW/m^2) - Potência radiante incidente por unidade de superfície.

⁴ **Número de sóis**, é o número de vezes que a radiação solar é concentrada.

Como já foi anteriormente referido a forma de maximizar o rendimento dos sistemas que tiram proveito da energia solar é por meio da utilização de espelhos ou lentes para focar os raios numa pequena área de material.

Por exemplo, os sistemas de baixa concentração concentram a radiação solar até um limite de 10 sóis, já os sistemas de alta concentração ultrapassam uma concentração superior a 500 sóis.

Por forma a saber a correta posição do coletor solar em qualquer altura do ano e em qualquer local do globo terrestre é necessário conhecer algumas relações geométricas entre o Sol e a Terra.

Assim é necessário proceder aos seguintes cálculos, para que o coletor acompanhe sempre o Sol durante todos os dias do ano.

Adotando uma visão **Ptolomaica**⁵ acerca do movimento “aparente” do Sol, a posição do Sol passa a ser descrita em função do ângulo da altitude solar, α e do ângulo de azimuth solar, z .

Assim para simplificação dos cálculos o ponto de referência será o meio-dia solar (que na zona extra tropical norte coincide com a direção cardinal Sul), altura em que o ângulo de altitude solar é 90° (o que só acontece duas vezes por ano na zona intra tropical), e o ângulo de azimuth solar é de 0°

No entanto, como os ângulos de altitude e azimuth solar não são ângulos fundamentais, estes têm de ser relacionados com os ângulos de nascer e por do sol, latitude e declinação solar.

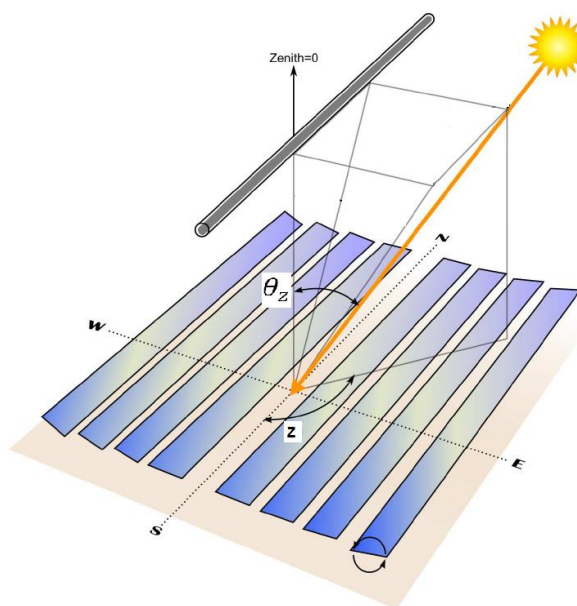


Fig. 17 Ângulo de azimuth solar z e ângulo de zênite solar θ_z , adaptado de [24]

⁵ A **Ptolomeu** se deve a obra astronómica “Almagesto”, que contém o 1º sistema completo sobre o Universo, o “sistema geocêntrico”. Pensamento derrubado mais tarde pela teoria heliocêntrica, defendida por Galileu Galilei.

3.2 MODELO DE ORIENTAÇÃO SOLAR

Para acompanhar o movimento do Sol, e para determinar a eficiência do concentrador solar proposto é necessário conhecer a quantidade de radiação solar incidente, bem como, a posição relativa do Sol para o local em estudo.

Na presente secção, com o apoio das enunciações apresentadas anteriormente na secção de heliotecnia, é estimada a quantidade de irradiação solar incidente para o local em estudo, parâmetro fundamental para a determinação da eficiência do concentrador solar Fresnel linear.

3.2.1 Declinação solar

A declinação solar δ é o ângulo definido entre o plano equatorial terrestre e a linha imaginária que vai do centro da Terra até ao centro do Sol.

$$\delta(\text{graus}) = 23,45^\circ \cos\left(\frac{360^\circ (284+n)}{365,25}\right) \quad \text{Eq. 3.1}$$

Onde n é o número do dia do ano, começa no 1 de Janeiro com $n=1,2,\dots,365$. O gráfico seguinte mostra o valor da declinação em graus para todos os dias do ano e de acordo com a duração do **calendário juliano**⁶.

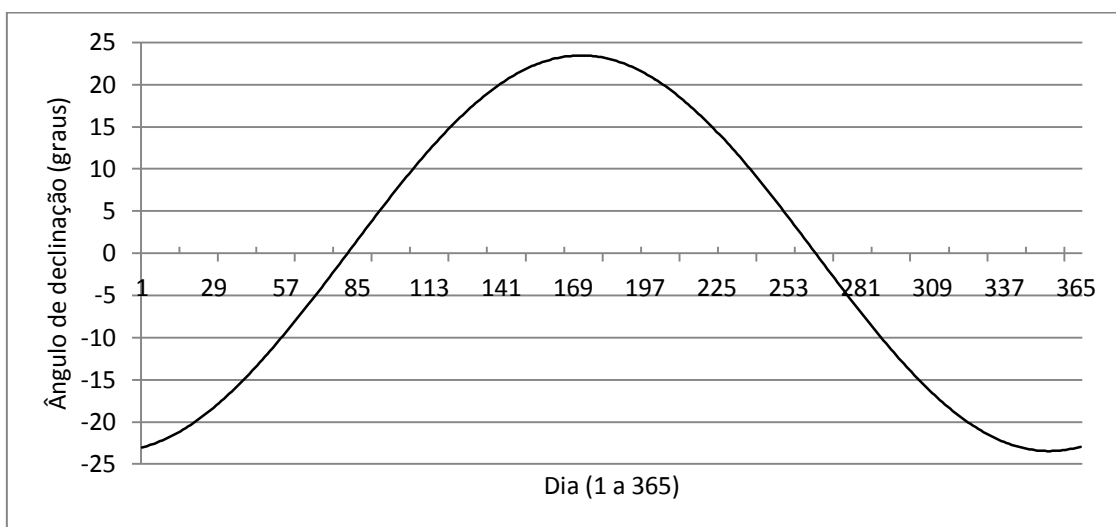


Fig. 18 Gráfico da declinação solar ao longo do ano

Como é visível no gráfico, a declinação solar varia ao longo do ano, mas a mesma, torna-se quase impercetível para o período de tempo de um dia.

⁶ **Calendário juliano** e *gregoriano*, baseados na duração da revolução aparente do Sol em torno da Terra. O 1º introduzido por Júlio César no ano de 46 a.C. e mais tarde modificado pelo imperador Augusto, atribui o valor de 365^d,25 ao ano trópico, quer dizer, é mais comprido que este cerca de 11 m 14 s, o que representa um excesso de 3 dias em 400 anos. Este calendário vigorou até à alteração do Papa Gregório XIII, em 1582.

Adaptado de: Enciclopédia Luso-Brasileira de Cultura, Ed. Verbo

O ângulo de declinação é máximo, 23,45° por volta do dia 21 de Junho, quando no Hemisfério Norte ocorre o solstício de Verão, e os raios solares incidem perpendicularmente ao trópico de Câncer (23° 27' N). E é mínimo, -23,45° quando, por volta de 22 de Dezembro, no Hemisfério Sul os raios solares incidem perpendicularmente à Terra sobre o Trópico de Capricórnio (23° 27' S).

Os nomes de “de Verão” e de “de Inverno” dados aos solstícios referem-se às estações do ano em que, no hemisfério Norte, estes ocorrem.

3.2.2 Ângulo horário

O ângulo horário, ω é definido como sendo a distância angular da Terra, entre a posição do Sol e o ponto cardeal Sul, definida a partir do seu eixo de rotação. Assim, por exemplo ao meio dia (hora solar, $hs = 12:00$) altura do dia em que o Sol se encontra a Sul, o ângulo horário será igual a zero graus. Por conseguinte, o ângulo horário será negativo durante as horas do período da manhã e positivo para as horas da tarde.

O movimento de rotação terrestre define a duração de cada dia, Portanto, são necessárias 24 horas para que o planeta descreva uma volta completa de 360°. Significa assim, que a Terra roda à taxa de 15° por hora (360°/24 h). O ângulo hora, ou horário é estimado da seguinte forma:

$$\omega(\text{graus}) = 15^\circ (hs - 12) \quad \text{Eq. 3.2}$$

3.2.3 Hora solar

O movimento aparente do sol pode ser calculado com exatidão em função do dia do ano, o qual se pode se obter com base nas seguintes fórmulas

A hora solar é usada para prever a incidência dos raios solares, num determinado ponto da superfície terrestre.

$$\text{Hora Solar}(\text{horas}) = LCT - D + \frac{ET}{60} - LC \quad \text{Eq. 3.3}$$

Onde, LCT (Local Current Time) é a hora local atual, à qual se subtrai a variável “D”, a qual assume o valor de “1” caso estejamos na estação de Verão, ou de “0” para a estação do Inverno (entenda-se horário legal de Verão e Inverno, respetivamente).

A equação do tempo (ET) é um fator de correção que toma em conta a variação da velocidade de translação da Terra, ao redor do Sol. A equação do tempo é calculada usando a seguinte equação:

$$ET(\text{minutos}) = E_1 + E_2 \cos(B) - E_3 \sin(B) - E_4 \cos(2B) - E_5 \sin(2B) \quad \text{Eq. 3.4}$$

Sendo, $E_1 = 0,0171885$; $E_2 = 0,42810824$; $E_3 = 7,35140686$; $E_4 = 3,3494657$; $E_5 = 9,3711702$ e B:

$$B(\text{graus}) = \frac{360^\circ}{365} (n - 1) \quad \text{Eq. 3.5}$$

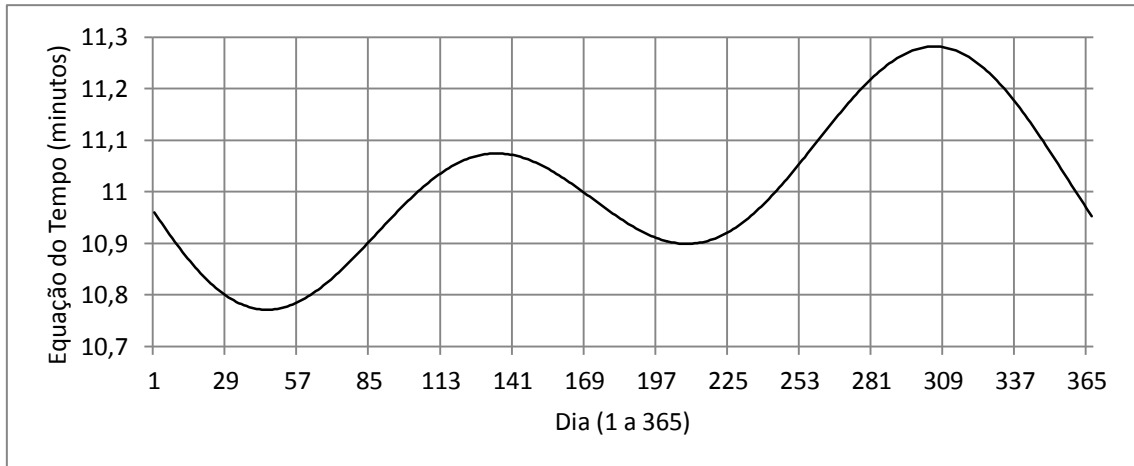


Fig. 19 Gráfico da variação do valor da equação do tempo ao longo do ano

A hora solar é diferente de lugar para lugar, isto é, depende da localização do observador. Assim é necessário corrigir a hora, em função da longitude onde se encontra o sistema em estudo, L_{local} , com a longitude do meridiano horário de referência, L_{st} , neste caso, o meridiano de Greenwich.

$$LC (horas) = \frac{L_{local} - L_{st}}{15} \quad \text{Eq. 3.6}$$

3.2.4 Ângulo de zénite e de elevação solar

Embora, a altitude solar e o ângulo de azimuth não sejam ângulos fundamentais, estes, estão intrinsecamente ligados às grandezas fundamentais de ângulo horário, latitude, e declinação solar.

O ângulo de zénite, θ_z , é definido como o ângulo formado pela linha imaginária do ponto de observação ao centro do Sol e o vetor perpendicular à superfície. Expresso geometricamente, como o ângulo complementar ao ângulo de altitude solar, e expresso matematicamente, por:

$$\theta_z (graus) = 90^\circ - \alpha \quad \text{Eq. 3.7}$$

O ângulo de zénite pode ser relacionado com o ângulo de declinação e com o ângulo horário (definido anteriormente na secção 3.2.2), através da seguinte expressão:

$$\cos \theta_z = \cos \lambda \cos \delta \cos \omega + \sin \delta \sin \lambda \quad \text{Eq. 3.8}$$

Ou pela expressão complementar

$$\sin \alpha = \cos \lambda \cos \delta \cos \omega + \sin \delta \sin \lambda \quad \text{Eq. 3.9}$$

Vem então, que o ângulo de elevação solar, α é:

$$\alpha = \arcsin (\cos \lambda \cos \delta \cos \omega + \sin \lambda \sin \delta) \quad \text{Eq. 3.10}$$

Onde λ é a latitude do local.

Igualando a equação a zero, resulta nos casos particulares, dos ângulos de nascente e poente do Sol, i.e. ângulos horários do nascer e do pôr-do-Sol, respetivamente:

$$\omega_{ns} = -\arccos(-\tan \lambda \tan \delta) \quad \text{Eq. 3.11}$$

$$\omega_{ps} = +\arccos(-\tan \lambda \tan \delta) \quad \text{Eq. 3.12}$$

De notar, que azimutes a este do Sul são negativos e azimutes a oeste do Sul são positivos.

A duração astronómica do dia pode ser assim, estimada com base na seguinte equação:

$$\text{Duração do dia (horas)} = \frac{\arccos(-\tan \lambda \tan \delta)}{7,5} \quad \text{Eq. 3.13}$$

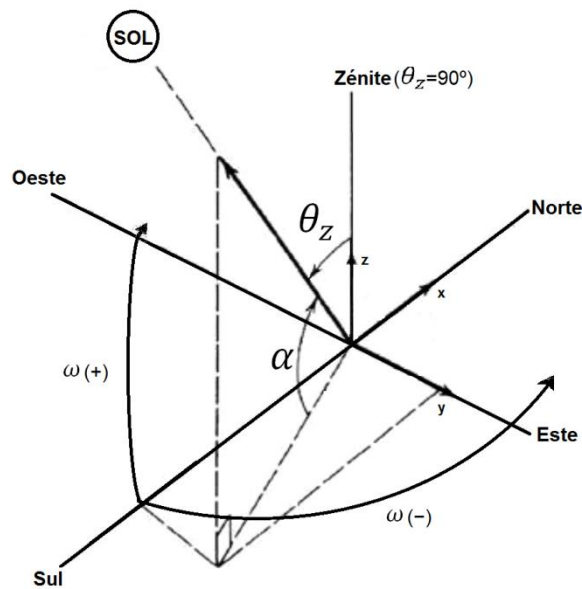


Fig. 20 Ângulo de zénite(θ_z) relacionado com o ângulo de altitude solar (α) e ângulo horário (ω) defenido apartrir do Sul

3.3 MODELO DE RADIAÇÃO SOLAR

O modelo utilizado para estimar a radiação solar ao nível do solo, foi o modelo de céu limpo, desenvolvido na criação do Atlas Europeu de Radiação Solar (ESRA). Este modelo é considerado pelos autores como o mais preciso, uma vez que, este tem em conta o fator de turvação e a elevação do local [23].

O fator de turvação é a função fundamental destes modelos, esta traduz a dispersão das moléculas de ar, sobretudo o vapor de água presente na atmosfera. Quanto maior for o fator de turvação, maior é a atenuação da radiação pela atmosfera.

Como é habitual nestes modelos, a radiação solar global horizontal é dividida nas componentes direta e difusa.

3.3.1 Irradiância global horizontal sob céu limpo

Componente direta

A irradiância solar direta numa superfície horizontal, expressa em kW/m^2 , para um dia de céu limpo é quantificada, por B_c .

$$B_c = I_0 \varepsilon \sin \gamma_s \exp(-0,8662 \cdot T_L(AM2) \cdot m \cdot \delta_R(m)) \quad \text{Eq. 3.14}$$

Onde I_0 é a constante solar e ε o fator de correção da distância Sol-Terra; γ_s é o ângulo de altitude solar, o qual é 0° no nascer e pôr-do-sol; $T_L(AM2)$ é o fator de turvação para uma massa de ar igual a 2; m é massa de ar ótica relativa; e $\delta_R(m)$ é o integral da espessura ótica de Rayleigh.

A massa de ar ótica relativa, m , representa o caminho percorrido pela radiação através da atmosfera. O seu valor depende do ângulo de altitude solar γ_s e a pressão atmosférica do local.

$$m = \frac{\left(\frac{p}{p_0}\right)}{\sin \gamma_s + 0,50572(\gamma_s + 6,07995)^{-1,6364}} \quad \text{Eq. 3.15}$$

A pressão atmosférica local p , é extrapolada com base na altitude do local em relação ao nível do mar onde a pressão p_0 , é constante.

$$\frac{p}{p_0} = \exp\left(-\frac{z}{H_R}\right) \quad \text{Eq. 3.16}$$

Onde z é a altitude do local e a altitude ao nível do mar e H_R é igual a 8434,5 m.

A espessura ótica de Rayleigh δ_R , é a espessura ótica de uma atmosfera Rayleigh, por unidade de massa de ar, ao longo de um determinado percurso. Como a radiação solar não é monocromática, a espessura ótica de Rayleigh depende do percurso específico da radiação e portanto da massa de ar ótica m . A parametrização usada é a seguinte:

$$\text{Se } m \leq 20; \frac{1}{\delta_R(m)} = 6,62960 + 1,75130m - 0,12020m^2 + 0,00650m^3 - 0,00013m^4 \quad \text{Eq. 3.17}$$

$$\text{Se } m > 20; \frac{1}{\delta_R(m)} = 10,4 + 0,718m \quad \text{Eq. 3.18}$$

Componente difusa

A irradiância solar difusa numa superfície horizontal, também depende do fator de turvação, $T_L(AM2)$. De facto, a quantidade de energia dispersa na atmosfera aumenta com o aumento da turvação. Portanto, à medida que a irradiância direta decai, a irradiância difusa aumenta. Porém um caso particular pode acontecer quando a baixas altitudes e elevados fatores de turvação a componente difusa diminuir, isto devido ao longo percurso percorrido pela radiação.

A Irradiância difusa, D_c , é determinada por:

$$D_c = I_0 \varepsilon T_{rd}(T_L(AM2)) \cdot F_d(\gamma_s, T_L(AM2)) \quad \text{Eq. 3.19}$$

Com:

O valor de transmissão difusa, T_{rd} , a situar-se entre 0,05 para um céu limpo ($(T_L(AM2)) = 2$) e 0,02 para um céu nublado, onde o fator de turvação é de sete, $(T_L(AM2)) = 7$.

$$T_{rd}(T_L(AM2)) = -1,5843 \times 10^{-2} + 3,0543 \times 10^{-2}T_L(AM2) + 3,797 \times 10^{-2}[T_L(AM2)]^2 \quad \text{Eq. 3.20}$$

E a função angular difusa $F_d(\gamma_s, T_L(AM2))$ a depender do ângulo de elevação solar e do fator de turbulência.

$$F_d(\gamma_s, T_L(AM2)) = A_0 + A_1 \sin \gamma_s + A_2 [\sin \gamma_s]^2 \quad \text{Eq. 3.21}$$

Os coeficientes A_0, A_1 e A_2 , são adimensionais e são dados por:

$$A_0 = 2,6463 \times 10^{-1} - 6,1581 \times 10^{-2}T_L(AM2) + 3,1408 \times 10^{-3}[T_L(AM2)]^2 \quad \text{Eq. 3.22}$$

$$A_1 = 2,0402 + 1,8945 \times 10^{-2}T_L(AM2) - 1,1161 \times 10^{-2}[T_L(AM2)]^2 \quad \text{Eq. 3.23}$$

$$A_2 = -1,3025 + 3,9231 \times 10^{-2}T_L(AM2) + 8,5079 \times 10^{-3}[T_L(AM2)]^2 \quad \text{Eq. 3.24}$$

Para o caso de valores $T_L(AM2) > 6$ em que os valores de A_0 são negativos, tem-se que:

$$A_0 = 2 \times 10^{-3} \quad \text{Eq. 3.25}$$

Componente global

Em síntese, a irradiância direta e difusa sob condições de céu limpo podem ser somadas para obtenção da irradiância global.

$$G_c = B_c + D_c \quad \text{Eq. 3.26}$$

3.3.2 Irradiação global horizontal sob céu limpo

Componente direta

Após a obtenção dos valores de m , $T_L(AM2)$ e δ_R o valor de irradiação direta pode ser calculada para qualquer altura do dia através da integração de B_c , utilizando o intervalo de tempo apropriado. O local pode estar parcialmente obstruído e/ou a Irradiação não incidir na superfície de interesse durante uma parte do tempo. Para ultrapassar estes problemas a irradiação direta foi formulada através de ajustamento de dados, para se obter um resultado dependente do fator de turvação. Então a irradiação direta, expressa em kWh/m², toma a forma:

$$B_c = I_0 \varepsilon T_{rb}(T_L(AM2)) \cdot F_b(\gamma_s, T_L(AM2)) \quad \text{Eq. 3.27}$$

Nota: a função de componente direta é zero se assumir valores negativos.

Aqui, a função $T_{rb}(T_L(AM2))$ é a função de transmissão direta. É calculada considerando zênite máximo do Sol, i.e. elevação do Sol é 90°. Portanto, nesta situação a massa de ar ótica relativa, m , é substituída pela razão $\frac{p}{p_0}$.

$$T_{rb}(T_L(AM2)) = \exp \left[-0,8662 \cdot T_L(AM2) \cdot \frac{p}{p_0} \cdot \delta_R \left(\frac{p}{p_0} \right) \right] \quad \text{Eq. 3.28}$$

e $F_b(\gamma_s, T_L(AM2))$ é a função angular direta, tem a forma polinomial de 2º grau:

$$F_b(\gamma_s, T_L(AM2)) = C_0 + C_1 \sin \gamma_s + C_2 [\sin \gamma_s]^2 \quad \text{Eq. 3.29}$$

Com os valores de C_0, C_1 e C_2 dados por:

$$C_0 = L_{00} + L_{01} T_L(AM2) (p/p_0) + L_{02} [T_L(AM2) (p/p_0)]^2 \quad \text{Eq. 3.30}$$

$$C_1 = L_{10} + L_{11} T_L(AM2) (p/p_0) + L_{12} [T_L(AM2) (p/p_0)]^2 \quad \text{Eq. 3.31}$$

$$C_2 = L_{20} + L_{21} T_L(AM2) (p/p_0) + L_{22} [T_L(AM2) (p/p_0)]^2 + L_{23} [T_L(AM2) (p/p_0)]^3 \quad \text{Eq. 3.32}$$

Os valores dos coeficientes de C_0 , C_1 e C_2 são apresentados na página seguinte na tabela 4 para três intervalos de elevação solar, ao meio-dia.

Tabela 4 Coeficientes L_{ij} para o cálculo dos coeficientes C_i

C_0	L_{00}	L_{01}	L_{02}	
$Ys_noon > 30^\circ$	-1,73E-02	-5,90E-03	6,89E-04	
$15^\circ < Ys_noon < 30^\circ$	-8,22E-03	4,56E-04	6,79E-05	
$Ys_noon \leq 15^\circ$	-1,17E-03	1,84E-04	-4,88E-07	
C_1	L_{10}	L_{11}	L_{12}	
$Ys_noon > 30^\circ$	1,03E+00	-1,22E-01	1,92E-03	
$15^\circ < Ys_noon < 30^\circ$	8,92E-01	-2,00E-01	9,97E-03	
$Ys_noon \leq 15^\circ$	7,41E-01	-2,24E-01	1,53E-02	
C_2	L_{20}	L_{21}	L_{22}	L_{23}
$Ys_noon > 30^\circ$	-7,22E-03	1,31E-01	-2,84E-03	0
$15^\circ < Ys_noon < 30^\circ$	2,54E-01	2,61E-01	-1,70E-02	0
$Ys_noon \leq 15^\circ$	3,50E-01	7,23E-01	-1,23E-01	5,92E-03

A

Eq. 3.29 pode ser reescrita em:

$$F_b(\omega, \phi, \delta, T_L(AM2)) = B_0 + B_1 \cos \omega + B_2 \cos(2\omega) \quad \text{Eq. 3.33}$$

Com:

$$B_0 = C_0 + C_1 \sin \phi \sin \delta + C_2 [\sin \phi]^2 [\sin \delta]^2 + 0,5 C_2 [\cos \phi]^2 [\cos \delta]^2 \quad \text{Eq. 3.34}$$

$$B_1 = C_1 \cos \phi \cos \delta + 2C_2 \sin \phi \sin \delta \cos \phi \cos \delta \quad \text{Eq. 3.35}$$

$$B_2 = 0,25C_2 [\cos \phi]^2 [\cos \delta]^2 \quad \text{Eq. 3.36}$$

Onde ϕ é a latitude do local (positiva para o Hemisfério Norte) e δ é a declinação solar (positiva quando o Sol está a Norte do equador: de 21 de Março até 23 de Setembro)

Finalmente a expressão final para a irradiação solar direta, onde é apresentado o integral da irradiação direta para o período entre os ângulos horários ω_1 e ω_2 , é dada por:

$$B_c(\omega_1, \omega_2) = I_0 \varepsilon \left(\frac{DL}{2\pi} \right) T_{rb}(T_L(AM2)) \cdot [B_0 \omega + B_1 \cos \omega + B_2 \cos(2\omega)]_{\omega_1}^{\omega_2} \quad \text{Eq. 3.37}$$

O integral da irradiação direta diária é obtido definindo $\omega_1 = \omega_{ns}$ e $\omega_2 = \omega_{ps}$.

Componente difusa

A irradiação difusa horizontal, $D_c(\omega_1, \omega_2)$, é calculada pela integração da equação da irradiação difusa, para qualquer período de tempo definido por ω_1 e ω_2 , e é igual a:

$$D_c(\omega_1, \omega_2) = I_0 \varepsilon \left(\frac{DL}{2\pi} \right) T_{rd}(T_L(AM2)) \cdot [D_0 \omega + D_1 \cos \omega + D_2 \cos(2\omega)]_{\omega_1}^{\omega_2} \quad \text{Eq. 3.38}$$

Os coeficientes D_0 , D_1 e D_2 são dados por:

$$D_0 = A_0 + A_1 \sin \phi \sin \delta + A_2 [\sin \phi]^2 [\sin \delta]^2 + 0,5 A_2 [\cos \phi]^2 [\cos \delta]^2 \quad \text{Eq. 3.39}$$

$$D_1 = A_1 \cos \phi \cos \delta + 2A_2 \sin \phi \sin \delta \cos \phi \cos \delta \quad \text{Eq. 3.40}$$

$$D_2 = 0,25A_2 [\cos \phi]^2 [\cos \delta]^2 \quad \text{Eq. 3.41}$$

O integral da irradiação difusa diária é obtido definindo $\omega_1 = \omega_{ns}$ e $\omega_2 = \omega_{ps}$.

Componente global

A irradiação global é obtida pela soma das componentes direta e difusa da irradiação, entre dois instantes t_1 e t_2 , de acordo com a equação:

$$G_c(\omega_1, \omega_2) = B_c(\omega_1, \omega_2) + D_c(\omega_1, \omega_2) \quad \text{Eq. 3.42}$$

Pode ser reescrita, para um dia de acordo com a seguinte expressão:

$$G_c(\omega_{ns}, \omega_{ps}) = B_c(\omega_{ns}, \omega_{ps}) + D_c(\omega_{ns}, \omega_{ps}) \quad \text{Eq. 3.43}$$

Onde os parâmetros ω_{ns} e ω_{ps} são respectivamente os ângulos horários de nascer e de pôr-do-sol úteis para calcular a irradiação global ao longo de um dia.

3.4 DIMENSIONAMENTO DO CONCENTRADOR SOLAR

Para que o sistema opere sempre na máxima eficiência é necessário calcular e discutir quais são os parâmetros de projeto que maximizam o desempenho do sistema LFR.

Como por exemplo, o posicionamento e geometria dos espelhos refletores e as características do recetor, que, se mal dimensionados podem induzir o sistema em perda de eficiência.

Torna-se então, necessário minimizar os erros de precisão ótica dos raios refletidos. Erros, esses relacionados com a sombra provocada pelos espelhos, que estão dispostos em filas paralelas, assim como, do próprio recetor, posicionado acima dos espelhos.

É neste âmbito que o presente capítulo aponta os compromissos essenciais a ter em conta no dimensionamento de todo o sistema, como por exemplo: a otimização ótica e a otimização térmica.

No dimensionamento entre espelhos e altura do recetor, existe um compromisso direto entre o espaçamento dos espelhos e o erro associado à perda de precisão dos raios refletidos, no recetor, como será apresentado.

3.4.1 Distância entre espelhos

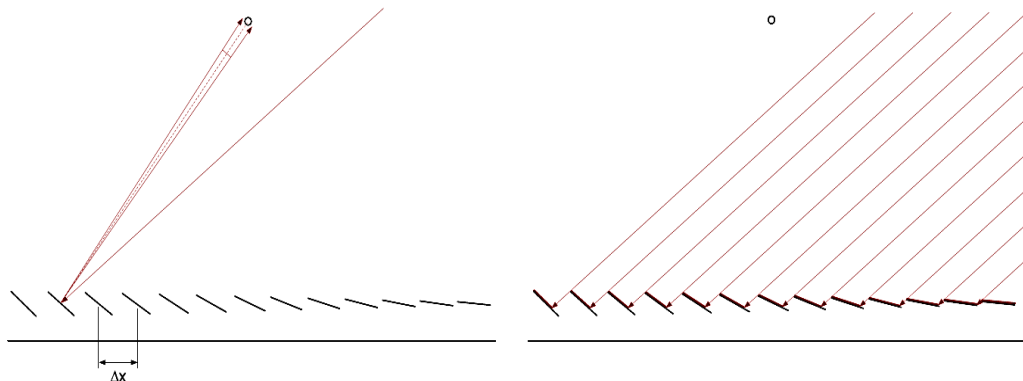


Fig. 21 Espaçamento de espelhos (ΔX): Erro de precisão Vs. Sombreamento dos espelhos

Uma distância maior entre espelhos, garante a ausência de sobreposição entre espelhos, mas em simultâneo ocorre uma maior dispersão da radiação refletida pelos espelhos, à altura do recetor.

Aplicar um menor espaçamento entre espelhos garante uma precisão maior dos raios refletidos no ponto focal, mas no entanto leva o sistema a um sobreposição indesejável nos espelhos adjacentes uns aos outros.

Assim, para garantimos uma boa concentração da radiação solar refletida, é necessário encontrar um meio-termo entre sobreposição e precisão focal.

3.4.2 Altura do recetor

Outra condição a ter em conta no dimensionamento de um sistema LFR, é a existência de uma relação de compromisso entre a altura do recetor e a oclusão entre espelhos.

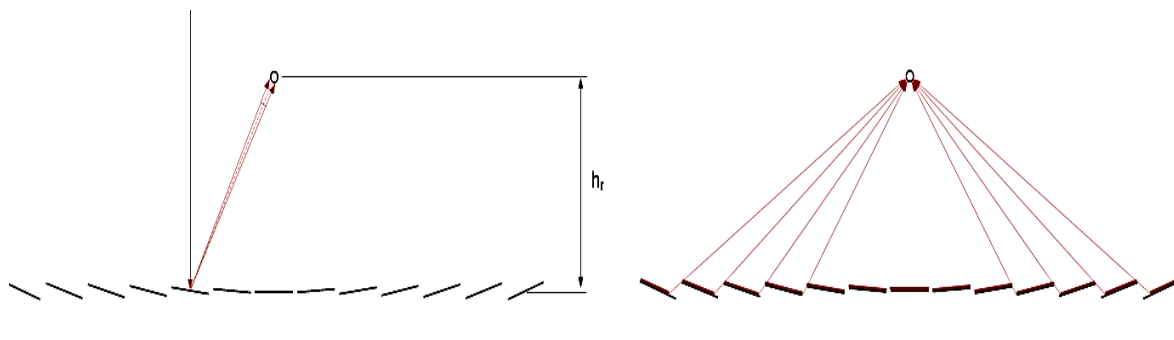


Fig. 22 Altura do recetor (h_r): Erro de precisão Vs. Obstrução dos espelhos

Uma maior altura do recetor traduz-se num aumento do erro da concentração focal, mas por outro lado, uma altura baixa do recetor bloqueia o trajeto dos raios solares refletidos pelos espelhos mais afastados do recetor horizontal.

Surge então a questão fundamental de dimensionamento do sistema:

Como parametrizar a distância ótima entre espelhos e a altura ótima do recetor, por forma a maximizar o desempenho ótico do sistema LFR?

Para responder à questão anterior, a secção que se segue é escrita com base no artigo científico produzido por Singh et al. [5], no qual é tido em conta os seguintes pressupostos:

- a) O concentrador está orientado para seguir o movimento aparente do Sol de Este para Oeste.
- b) Os espelhos possuem um elevado índice de reflexão.
- c) A radiação solar incidente é normal à superfície terrestre.
- d) Todos os espelhos são planos e têm largura e comprimento iguais.

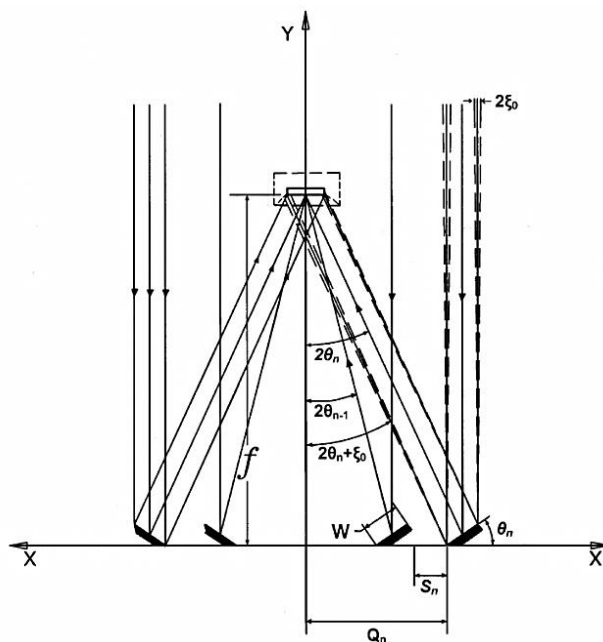


Fig. 23 Corte transversal de um sistema refletor Fresnel linear com um absorvedor de cavidade trapezoidal. [5]

Uma distância de espaçamento (S), de *shift*, é igualmente determinada, de modo a evitar sobreposições entre espelhos adjacentes.

Cada espelho (n) pode ser caracterizado por três parâmetros, são eles, a sua, localização (Qn), inclinação (θ_n) e espaçamento (Sn), como ilustra a figura anterior. As expressões que se seguem foram usadas para obter estes parâmetros.

$$\theta_n = \frac{1}{2} \tan^{-1} \{ [Q_n + (W/2) \cdot \cos \theta_{n-1}] / [f - (W/2) \cdot \sin \theta_{n-1}] \} \quad \text{Eq. 3.44}$$

$$S_n = W \cdot \sin \theta_{n-1} \cdot \tan(2\theta_n + \xi_0) \quad \text{Eq. 3.45}$$

$$Q_n = Q_{n-1} + W \cdot \cos \theta_{n-1} + S_n \quad \text{Eq. 3.46}$$

Com $\theta_0 = 0$, $S_1 = 0$, $Q_0 = -W/2$, $Q_1 = W/2$ como condições iniciais do cálculo iterativo e $n=1,2,\dots,m$, onde, 'm' é o número total de espelhos colocados em cada metade do concentrador

Assim a localização (Q), inclinação (θ) e espaçamento (S) de cada espelho para o protótipo a construir, são apresentados na Tabela 6, em anexo.

3.4.3 Rácio de concentração

Quando se pretende atingir temperaturas mais elevadas do que as que convencionalmente se obtêm por captura direta da radiação incidente, a concentração solar torna-se um parâmetro incontornável. Embora possa ser dividida em várias componentes, quando se refere o termo concentração geralmente este geralmente refere-se a concentração geométrica definida como a razão entre a área de captura (refletora) A_C , projetada na direção da luz incidente na área do recetor A_R :

$$\text{Concentração} \equiv RC_{\text{Geometrico}} = \frac{A_C}{A_R} \quad \text{Eq. 3.47}$$

O rácio de concentração (RC) do concentrador Fresnel, é calculado de forma diferente do RC de um concentrador parabólico genérico, pois tem em conta o ângulo de incidência dos vários espelhos.

$$CI_n = W \cdot \cos \theta_n / (U_n + D_n + I_n) \quad \text{Eq. 3.48}$$

Onde os parâmetros U_n , D_n e I_n , vêm dados por:

$$U_n = [(f - W \cdot \sin \theta_n) \sec 2\theta \cdot \sin \xi_0] / [\cos(2\theta_n - \xi_0)] \quad \text{Eq. 3.49}$$

$$D_n = [W \cdot \cos \theta_n \cdot \sec 2\theta] \quad \text{Eq. 3.50}$$

$$I_n = [f \cdot \sec 2\theta \cdot \sin \xi] / [\cos(2\theta_0 + \xi_0)] \quad \text{Eq. 3.51}$$

Assim, o RC do concentrador Fresnel é obtido através da soma da contribuição individual de todos os espelhos, por meio da seguinte fórmula:

$$RC = 2 \sum_{n=1}^{n=m} CI_n \quad \text{Eq. 3.52}$$

Em anexo apresenta-se a Tabela 7 com o rácio de concentração; as áreas estimadas de captação e reflexão do concentrador do tipo Fresnel, para diferentes conjuntos de espelhos.

3.4.4 Propriedades óticas dos materiais

Quando a radiação atinge um corpo, parte dessa radiação é refletida, parte é absorvida, e, se o material é transparente, uma parte é transmitida.

A fração da radiação incidente que é refletida é definida como o índice de reflexão (ou reflectância), ρ , a fração absorvida como absorvidade (ou absorvência), α e a fração transmitida como a transmissividade (ou transmitância), τ .

Quando se trata de radiação solar, existem dois tipos de reflexão de radiação: a reflexão direta e a reflexão difusa. Reflexão direta é aquela em que o feixe refletido faz com a normal ao espelho um ângulo igual ao do feixe de luz incidente. A reflexão difusa é aquela em que a radiação refletida é distribuída uniformemente em todas as direções.

No entanto, nestes sistemas de coletores solares, existe outro tipo de superfície, as superfícies seletivas. Por norma o absorvedor (recetor), utilizado reveste-se de uma camada de tinta seletiva. As superfícies seletivas são uma combinação de alta absorvência para a radiação solar com uma baixa emissividade para a radiação refletida.

Portanto, a energia entregue ao recetor, E_f (kW), para diferentes rácios de concentração pode ser estimada da seguinte forma:

$$E_f = (A_c - A_{nc})I \cdot \rho \cdot \gamma \cdot \tau \cdot \alpha \quad \text{Eq. 3.53}$$

Onde:

A_c é a área de reflexão (obtida pela área dos espelhos menos a área de sombra do recetor) [m];

A_{nc} , é a área útil para a concentração dos raios solares (área de espaçamento entre espelhos)[m];

I é a irradiação solar direta no plano normal ao coletor [kW/m²];

E ainda, onde, as propriedades óticas dos materiais, abordadas em detalhe na secção 3.5, vem dadas por:

Tabela 5 Parâmetros óticos assumidos para o coletor LFR

0,94±0,02	ρ	índice de refletividade dos espelhos
0,97	γ	fator de intercepção (fração da radiação refletida que é intercetada pelo absorsor)
0,9	τ	transmissividade da cobertura de vidro (caso fosse usado)
0,96	α	absortividade do recetor pintado de preto
1,10	K	factor de reflexão da cavidade

A fração de radiação refletida que efetivamente atinge os tubos absorvedores é calculada da seguinte forma [21]:

$$S_r = (A_c - A_{nc})I \cdot \rho \cdot \gamma \cdot \tau \cdot \alpha \cdot k \quad \text{Eq. 3.54}$$

Onde $k=1,01$, é o fator de reflexão da cavidade.

O rendimento ótico do sistema LFR vem definido na seguinte fórmula [21]:

$$\eta_{optico} = \frac{S_r}{I} \quad \text{Eq. 3.55}$$

O rendimento ótico é a razão entre a potência entregue ao coletor após duas reflexões, a primeira reflexão acontece nos espelhos que são caracterizados segundo o índice de reflexão ρ e a segunda reflexão que ocorre nas paredes refletoras da cavidade trapezoidal e que é parametrizada pelo factor de reflexão da superfície da cavidade, K . Entre outros parâmetros óticos. Simplificando, a expressão de rendimento ótico pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\eta_{optico} = \rho \cdot \gamma \cdot \tau \cdot \alpha \cdot k \quad \text{Eq. 3.56}$$

3.5 MODELAÇÃO TÉRMICA

Antes de passar aos cálculos de modelação térmica para o sistema em estudo, é importante relembrar alguns conceitos teóricos e grandezas associadas à transferência de calor.

Nesta seção 3.5 serão analisadas as potenciais formas de minimizar as perdas térmicas bem como as várias adaptações capazes de se adequar a um concentrado linear.

Esta seção não termina sem antes ser feita uma análise do formulário relacionado com rendimento do sistema.

3.5.1 Balanço de energia

A conversão térmica da energia solar consiste na captação de radiação numa superfície absorvedora e na transferência desta energia, sob a forma de calor para o elemento que irá receber a energia útil.

A temperatura atingida no elemento que recebe a energia útil resulta do balanço entre a quantidade de radiação absorvida e as perdas térmicas existentes. A temperatura, ou energia útil, é maximizada aumentando a quantidade de radiação absorvida na superfície absorvedora diminuindo as perdas térmicas do conjunto.

O elemento que recebe a energia útil pode circular através do absorvedor, removendo a energia (no caso de um dispositivo termoelétrico, fluido de transferência de calor) ou pode permanecer no absorvedor (caso de uma célula fotovoltaica), aumentando gradualmente a temperatura do conjunto e, conseqüentemente, as perdas térmicas.

3.5.2 Ganhos térmicos

A quantidade de radiação solar absorvida na superfície absorvente é determinante para a quantidade de energia útil obtida e depende das características da superfície e da quantidade de radiação que a atinge.

A quantidade de radiação absorvida pela superfície absorvedora depende assim da sua absorvidade, α .

A quantidade de radiação solar disponível na superfície absorvedora pode ser aumentada utilizando refletores que permitam a concentração da radiação, aumentando, conseqüentemente, a energia útil extraída do conjunto.

3.5.3 Perdas térmicas

As perdas térmicas podem ocorrer de três modos de transferência de calor: por **condução**, por **convecção** e por **radiação**.

Na **transferência por condução**, o calor propaga-se de duas formas: através de fonões (vibrações na rede cristalina), ou através dos elétrons nos materiais condutores elétricos.

A transferência de calor por condução térmica é descrita através da lei de Fourier:

$$\vec{q} = -k\nabla T$$

$$\vec{q} = -k \cdot \nabla T \quad \text{Eq. 3.57}$$

Ou para uma dada direção no espaço por:

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad \text{Eq. 3.58}$$

Em que k representa a condutividade térmica do material e $\frac{dT}{dx}$ o gradiente de temperatura a que está sujeito.

As perdas térmicas por condução podem ser minimizadas através do isolamento térmico do conjunto e da redução da área superficial por onde estas perdas térmicas ocorrem.

O material utilizado no revestimento térmico deve ser resistente à humidade, bem como às temperaturas que possam ocorrer no conjunto.

Existe uma diversidade enorme de materiais que podem ser utilizados no isolamento térmico, desde materiais mais simples e acessíveis, tais como papel de jornal ou esferovite, a materiais mais elaborados, tais como lã de vidro, lã de rocha, poliestireno expandido, aglomerado de cortiça, entre outros.

Facão et al. [25] conclui no seu estudo que um isolamento de 35 mm de lã de rocha apresenta um bom compromisso entre isolamento térmico e sombreamento provocado pelo recetor sobre os espelhos.

Na **transferência por convecção**, o calor propaga-se devido ao movimento de um ou mais fluidos que em contacto com um corpo a uma determinada temperatura lhe retiram calor.

Uma expressão relativa a um caso estacionário (temperatura constante no corpo) da lei do arrefecimento de Newton, que constitui uma aproximação simples a esta problemática é apresentada a seguir:

$$\frac{Q}{A} = \bar{h} (T_c - T_a) \quad \text{Eq. 3.59}$$

Em que T_c é a temperatura do corpo, T_a a temperatura do meio e \bar{h} o coeficiente de convecção térmica médio do material.

As perdas térmicas por convecção podem ser minimizadas reduzindo a circulação de ar sobre a superfície absorvente, através da utilização de uma cobertura transparente, em plástico ou vidro; ou mesmo através da colocação da superfície absorvente em vácuo, caso em que estas perdas se eliminam.

Quando se utiliza uma cobertura sobre o absorvedor, esta deve ter uma elevada transmitância, τ . De todos os materiais o vidro é aquele que apresenta uma elevada transmitância no espectro da radiação solar

A utilização de uma cobertura em vidro sobre a superfície absorvedora permite, assim, a criação do chamado efeito de estufa, diminuindo as perdas por convecção no interior da cavidade.

Na **transferência por radiação**, um corpo vai libertar calor sob a forma de radiação eletromagnética, que será tanto mais energética quanto maior for a temperatura a que o corpo se encontra. A taxa de energia radiada por um corpo negro pode ser obtida através da lei de Stefan-Boltzmann, apresentada em seguida:

$$Q_r = A\sigma\epsilon T^4 \quad \text{Eq. 3.60}$$

Em que $\sigma \approx 5,670400 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ é a constante de Stefan-Boltzmann, T a temperatura absoluta do corpo, ϵ é a emitância característica do material e A a área da superfície.

As perdas térmicas por radiação podem ser minimizadas através da minimização da área da superfície absorvedora, ou através da utilização de uma superfície de absorção seletiva. Deste modo a utilização de superfícies seletivas para a mesma área de absorvência apresentará valores de menor emissividade de radiação.

3.5.4 Refletores secundários

Outra solução é a aplicação de refletores secundários que permitem a reflexão da radiação solar refletida pelos espelhos (refletores primários) sobre a superfície absorvente, o que resulta numa menor área de absorvedor para a mesma quantidade de energia absorvida.

Dado que as perdas térmicas são proporcionais à área superficial, absorvedores com menor área apresentam por este motivo menores perdas térmicas.

Neste sentido, vários recetores LFR têm sido propostos. Os dois conceitos de *design* mais conhecidos são a "caixa-forno" apresentado à esquerda na figura 23, conceito que utiliza um conjunto de pequenos tubos de absorção paralelos aninhados dentro de uma cavidade refletora trapezoidal, termicamente isolada e o recetor concentrador parabólico composto apresentado à direita na figura 23, apresentado por Morin, que é constituído por um refletor secundário que reflete a radiação para um absorvedor tubular. Outros conceitos têm sido propostos, como os de Goswami e Mills & Morrison.

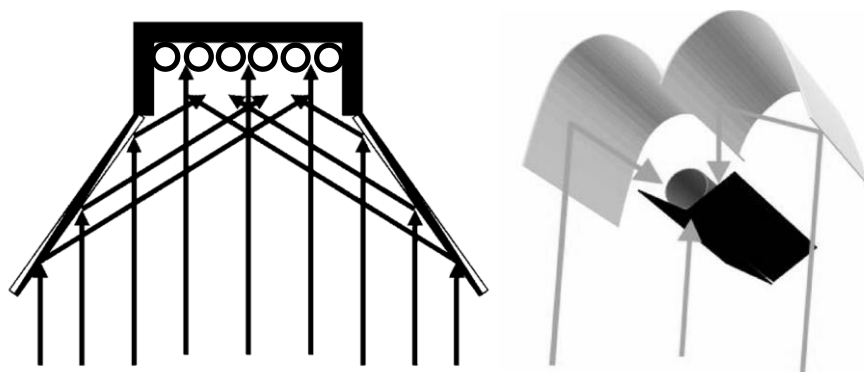


Fig. 24 Géneros de refletores secundários propostos para um sistema Fresnel linear.

3.5.5 Superfície absorvedora seletiva

Deste modo, as perdas térmicas por radiação são inferiores em absorvedores que apresentam um revestimento por superfície seletiva.

Facão et al. [25] comprova que a eficiência térmica do sistema é 10% superior com a aplicação de uma camada seletiva de níquel quando comparada com uma superfície absorvedora pintada com uma tinta preta comum.

Como já foi referido o vidro apresenta uma elevada transmitância no espectro da radiação solar, mas para além deste facto, para comprimentos de onda maiores, da zona do infravermelho, este tem uma reduzida transmitância. O que permite reduzir as perdas por radiação, através da captura da radiação infravermelha emitida pelo absorvedor.

Importa ainda definir a resistividade e condutividade térmica dos materiais, como a capacidade de um material ou meio, se opor, ou não à transferência de calor. Assim, a condutividade térmica (inversa da resistividade) consiste na capacidade de um material ou meio conduzir calor.

3.5.6 Eficiência térmica

O desempenho de um recetor solar genérico pode ser calculado, de forma simples, através da comparação entre a radiação solar disponível num período de tempo e o aumento de temperatura de um volume de água no interior do recipiente de cocção.

O rendimento do recetor é, deste modo, dado pela relação:

$$\eta = \frac{m \times C_p \times (T_f - T_i)}{I_g \times A_{col}} \quad \text{Eq. 3.61}$$

E a potência do recetor pela relação:

$$P = m \times C_p \times (T_f - T_i) \quad \text{Eq. 3.62}$$

Em que:

m representa a massa de água, em [kg]

C_p representa o calor específico da água a pressão constante, igual a 4185 em [J/kg. °C]

T_i representa a temperatura inicial da água, em [°C]

T_f representa a temperatura final da água, em [°C]

I_g representa a irradiação global no plano horizontal, para um dia com céu limpo, ao meio dia solar [kW/m²]

A_{col} representa a área do vidro (se recetor for encapsulado) ou do coletor, em [m²]

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Este trabalho enquadra-se num projeto de ID desenvolvido para um grupo empresarial e é por este motivo parte das soluções construtivas são alvo de confidencialidade comercial. Estas restrições impedem assim que pormenores técnicos ligados ao armazenamento e à geração de eletricidade por meio de células Seebeck não possam ser descritos pormenorizadamente neste documento.

O protótipo do género refletor Fresnel linear agora construído é comparado com o anterior protótipo de um concentrador disco parabólico.

O novo protótipo LFR é composto por 6 espelhos móveis cada um com o seu eixo orientado na direção Norte-Sul, refletem a radiação solar para um refletor de cavidade do tipo trapezoidal que está localizado a 1m sobre estes.

Os ângulos de inclinação de cada espelho foram calculados tendo por base o modelo de dimensionamento anterior e as formulações aí presentes. Nos vários ensaios práticos os ângulos são ajustados manualmente visto este ser um protótipo e por isso um estudo preliminar para um sistema de maior dimensão. No entanto e como consta nos trabalhos futuros prevê-se que este ajuste de inclinação seja realizado de forma automática e mecânica.

Neste capítulo os factos resultantes da implementação da investigação são apresentados de forma resumida, em forma de tabelas e/ou gráficos. Os resultados estão expostos de forma objetiva.

A relevância relativa dos diversos tipos de resultados será aferida, bem como as considerações analíticas, ou seja, os resultados alcançados após a aplicação do método apropriado são comparados entre si e com os objetivos particulares previamente estabelecidos.

A discussão permite também estabelecer comparações entre os resultados estudos científicos previamente efetuados.

Apresenta-se ainda neste capítulo e com o devido detalhe as decisões técnicas dos elementos que constituem o sistema, nomeadamente o recetor e o coletor de águas quentes.

Os ensaios que aqui são alvo discussão são dois, são eles a temperatura da água e medição da evolução da temperatura do depósito de sal (armazenamento de calor) ao longo do dia.

Estas medições foram realizadas em dias com boa insolação com recuso a um termopar do tipo E e vão de encontro aos dois objetivos gerais, de realizar

4.1 CÁLCULOS SOLARES

Quanto ao modelo de irradiação solar, os cálculos efetuados tiveram em conta a localização e período da investigação. Assim, os testes práticos aos concentradores ocorreram em Abrantes, Santarém, na latitude 39°29' N e longitude 8° 11'O. Durante o período de 30 Julho a 15 de Setembro. Para simplificação de cálculos o dia selecionado para os cálculos é o dia 15 de Setembro. Os resultados teóricos obtidos seguindo o modelo ESRA para céu limpo e o modelo de geometria solar, são aqui confrontados com dados reais.

Já os dados reais de radiação solar para a região de Abrantes referentes ao ano de 2005, que serviram de controlo ao dados teóricos foram retirados do sítio da internet: www.soda-is.com/eng/index.html⁷

Os dados reais da irradiação fornecidos pelo site para dia o 15 de Setembro de 2005 são apresentados no [ANEXO](#): “Dados Reais Irradiação”. E neste ponto, o modelo ESRA, considera-se válido, pois os dados teóricos têm correspondência com os dados reais da estação meteorológica da cidade de Abrantes.

Já os cálculos realizados com base no modelo ESRA para a irradiância solar, para o plano horizontal, foram confrontados com a irradiância para o dia 15 de Setembro fornecida pelo sítio da internet: <http://meteoabrant.es.no-ip.info/>

Pelo que verifica-se que estes dados reais da irradiância solar também estão consonância com os dados teóricos estimados com recurso modelo ao de céu limpo da ESRA.

⁷ “Solar Radiation Data” (SoDa) é um projeto que oferece acesso a um grande conjunto de informação relacionada com a radiação solar e o seu uso. A inovação é que é feito a partir de um sistema inteligente (*SoDa IS*) que conecta outros recursos que se encontram em diversos países.

4.2 DIMENSIONAMENTO

Os cálculos de dimensionamento apresentados para o sistema refletor Fresnel Linear, foram também verificados e validados através de uma simulação em MATLAB assumindo uma largura do espelho refletor(W)=401 mm, e uma altura do recetor (f)=2500 mm.

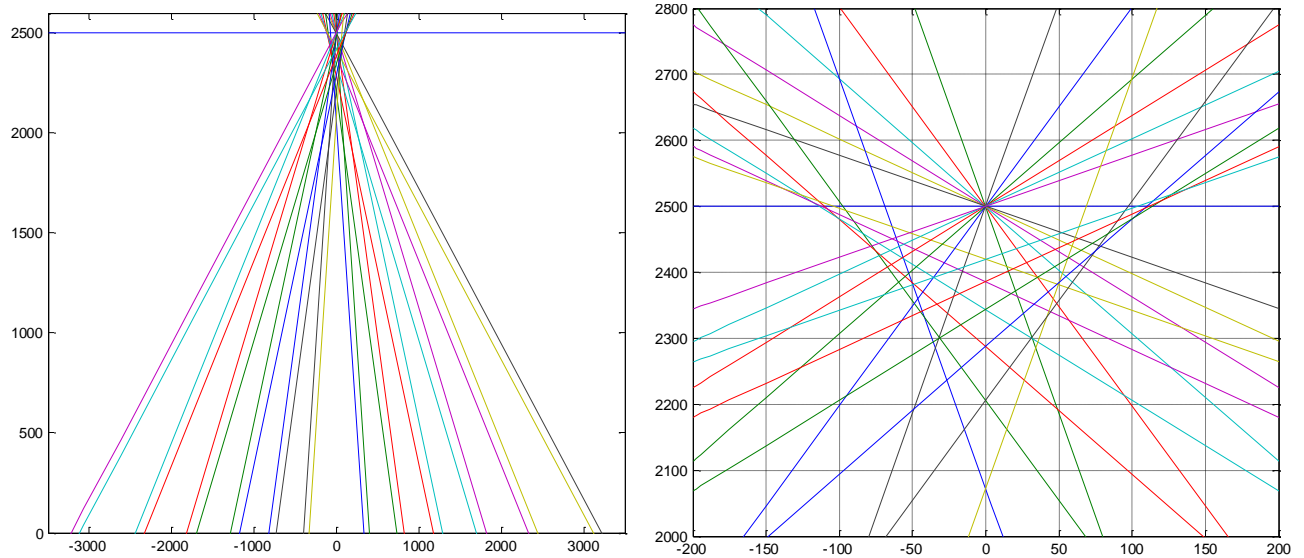


Fig. 25 Projeção dos raios refletidos por (2×)6 espelhos. À direita pormenor da projeção dos raios no recetor situado a 2500 mm de altura, (largura do espelho (W) 401 mm).

A Fig. 25 (dir.) mostra que a distribuição da concentração no plano focal não é uniforme. É visível que a maior concentração dos raios refletidos ocorre numa largura aproximadamente igual a metade da largura do espelho. Após este valor a concentração decai rapidamente para zero até à largura máxima de 200,5 mm, a qual é, equivalente a metade da largura do espelho (W) = 401 mm.

A observação foi igualmente validade seguindo o resultado obtido por Singh et al [5], Fig. 26.

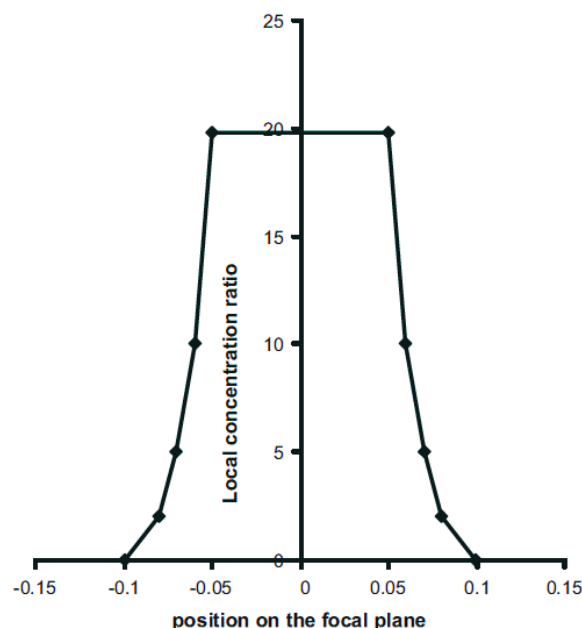


Fig. 26 Distribuição dos raios para uma concentração de 19,8; largura do espelho W = 100 mm, altura do recetor f = 1300 mm [5]

4.2.1 Rácio de concentração

A eficiência térmica diminui, à medida que o rácio de concentração aumenta, porque da subida da temperatura global do sistema no ponto focal, contribui para o aumento da perda de calor para a envolvente do recetor, por irradiação térmica.

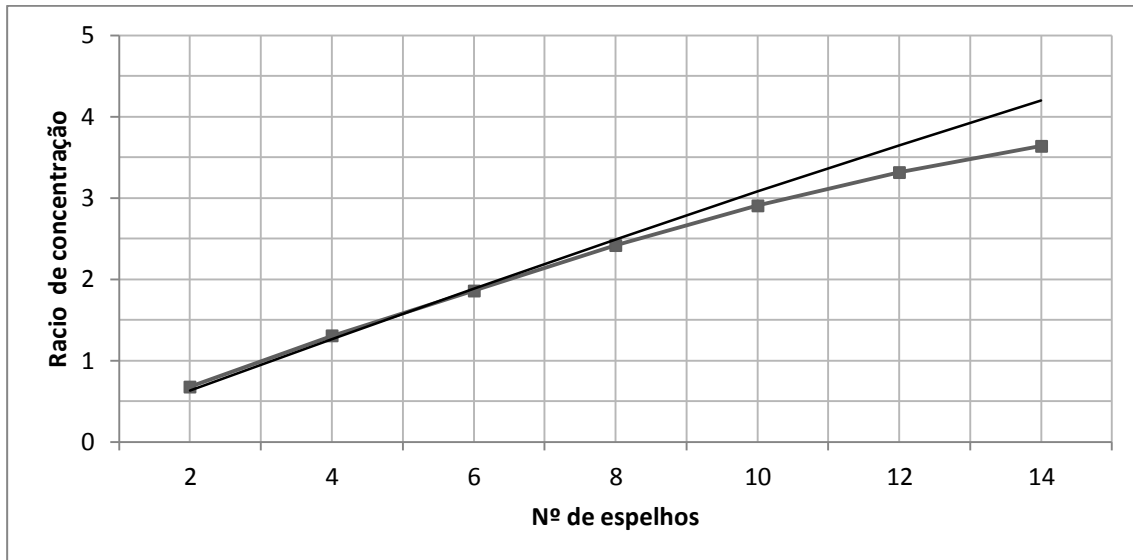


Fig. 27 Relação entre o rácio de concentração e o número de espelhos (largura do espelho, $W = 401$ mm, altura do recetor, $f = 2500$ mm).

Pela observação do gráfico que relaciona o rácio de concentração com o número de espelhos torna-se visível que o rácio de concentração diminui com o aumento do número de espelhos. Segundo esta simulação o rácio de concentração diminui significativamente a partir dos 8 espelhos.

Surge assim a segunda pergunta, sobre o correto dimensionamento do protótipo LFR:

Qual o número ótimo de espelhos do sistema LFR?

O número de espelhos adequado é discutível segundo o propósito final de qualquer sistema LFR. Podendo ser estabelecida um intervalo de confiança de seis até oito espelhos para cada lado, isto equivale doze a dezasseis espelhos no total.

Sabendo que à partida não há nenhuma relação matemática direta que explique a relação entre o rácio de concentração e a altura do foco; existe no entanto e com base na análise do conjunto dos gráficos acima, uma explicação plausível que permite afirmar, o seguinte:

O rácio de concentração varia mais significativamente em função da altura do foco para espelhos de menor largura (ver Fig. 27).

Nota do autor:

Aconselha-se a leitura do artigo científico:

Mathur, S.S.;Negi, B.S.; Kandpal, T.C.; "Geometrical Designs and Performance Analysis of a Linear Fresnel Reflector Solar Concentrator with a Flat Horizontal Absorber"; International Journal of Energy Research, 1990, Vol. 14, pag. 107-124

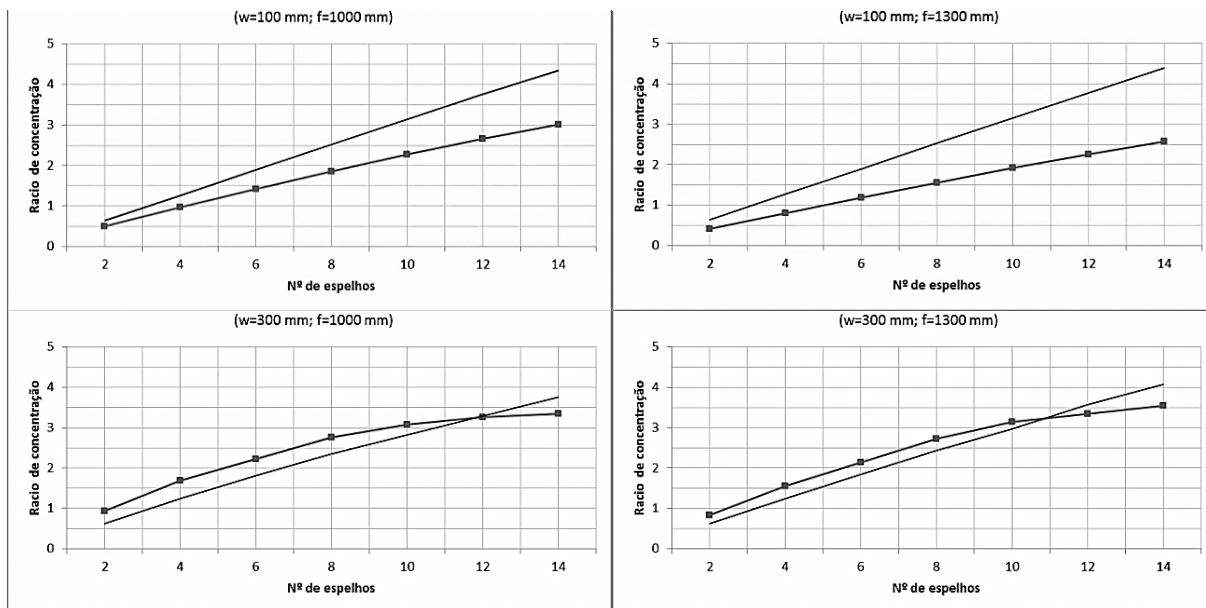


Fig. 28 Variação do rácio de concentração em função da largura dos espelhos e altura do foco.

Outra situação que estes gráficos demonstram é que para o mesmo número de espelhos, o rácio de concentração é maior para sistemas LFR com espelhos de maior largura.

Isto deve-se à razão de a área total de reflexão ser menor face à área total do concentrador. Ou seja, uma menor largura dos espelhos leva a que haja mais espaços entre as filas de espelhos e por isso a relação entre área útil e área refletida diminui.

4.3 RECETOR

Nenhuma superfície real é completamente refletora, mas para os coletores de concentração solar melhorarem o seu desempenho térmico, de várias opções disponíveis (cobre, ouro, alumínio anodizado), só uma superfície espelhada (espelhos) se aproxima da situação ideal de reflexão total. Assim a solução encontrada para resolver esta questão foi o uso de uma chapa de aço inoxidável com alto índice de refletividade. Isto porque, não poderia ser um espelho devido aos choques térmicos que se fazem sentir no interior da cavidade.

Fação e Oliveira [25] concluem no seu estudo geométrico que a inclinação de 50° foi encontrada como a mais aceitável para as paredes laterais da cavidade. No entanto a interpretação dos dados calculados apresenta outro valor, o que, para o caso do protótipo em estudo será de 46° . Esta inclinação tem em conta a inclinação de 65° da última fileira de espelhos, ou seja, este é um parâmetro que varia consoante o número de filas de espelhos.

Portanto, para o protótipo em desenvolvimento com todos os espelhos de igual largura, $W = 300$ mm, com o foco a uma altura, $f = 1000$ mm, a inclinação calculada é de 46° , valor que se verificou como sendo o mais adequado durante testes práticos.

Outros dois parâmetros como a profundidade do recetor e a espessura do isolamento foram analisados, através da leitura de vários autores.

Facão e Oliveira [25] referem que uma cavidade de profundidade 45 mm, apresenta o coeficiente de transmissão de calor mais baixo. Segundo o mesmo estudo um isolamento de 35 mm de lã de rocha garante um bom compromisso entre isolamento térmico e sombreamento. Já os autores Natarajan, Reddy, Mallick (2011) referem um isolamento de 100 mm, para minimizar as perdas de calor para o ambiente.

O protótipo na sua fase final de concepção, Fig. 29, apresenta uma cavidade trapezoidal de 300 mm de profundidade e uma espessura de isolamento de 60 mm no topo. Nas paredes laterais da cavidade o isolamento tem uma espessura de 30 mm de isolamento, indo de encontro à explicação anterior acerca do sombreamento sobre os espelhos.

Outra explicação prática que surge para uso de lã de rocha, é que, este material em confronto com outros é ignífugo, como de resto se comprovou. Quando foi submetida uma amostra deste material no foco de concentração, este não ardia, a única alteração registada é a perda da sua característica coloração amarela.

O recetor como é visível no esquema da figura 26 possui na sua cavidade trapezoidal um colector formado por 11 tubos de cobre com o diâmetro de 6 mm.

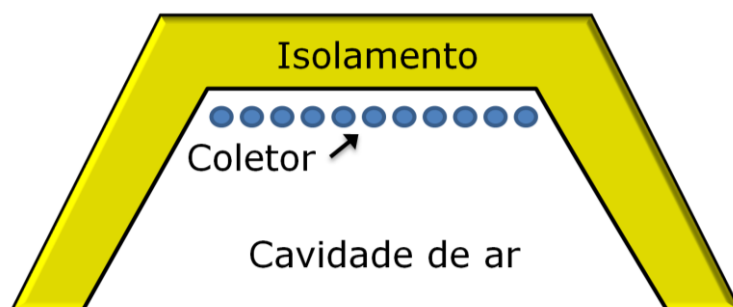


Fig. 29 Vista em corte do recetor, onde é apresentado o isolamento e coletor.

Outra parametrização estudada neste protótipo LFR foi o aumento de temperatura por meio da aplicação de uma tinta preta seletiva. Facão e Oliveira [25] referem que a eficiência térmica do sistema é 10% superior com a aplicação de uma camada seletiva de níquel quando comparada com uma superfície absorvente pintada com uma tinta preta comum.

No entanto esta questão foi abordada, mas não com o detalhe pretendido pelo investigador devido aos escassos recursos físicos e financeiros disponíveis. Ainda assim, foi estudada a vantagem de se pintar o absorvedor com tinta preta comum.

Os resultados da Fig. 29 mostram que não se verifica qualquer tipo de influência, em relação à temperatura registada no interior do depósito de sal para um acabamento pintado com tinta preta considerada seletiva *versus* um acabamento não seletivo (cru), isto é, apresenta a cor natural do alumínio.

As quebras registadas nas temperaturas em ambos os casos devem-se a fatores externos, não controláveis, como o vento e a presença pontual de nuvens.

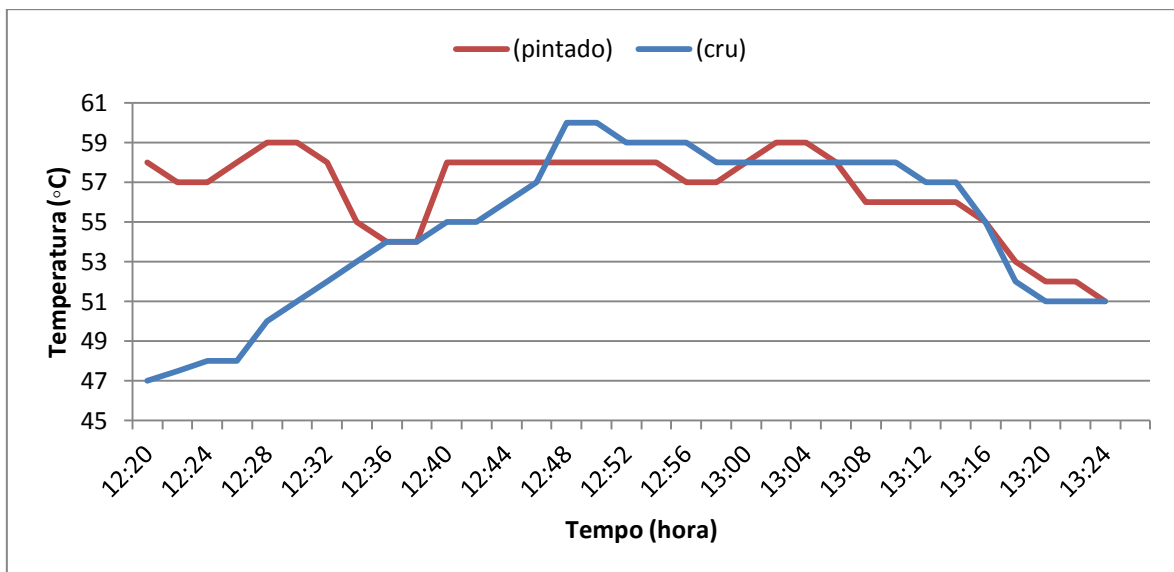


Fig. 30 Temperatura do depósito de sal (tipo de acabamento).

4.3.1 Armazenamento de calor

O gráfico da Fig. 30, mostra a evolução da temperatura no interior do depósito de sal.

Os ensaios foram realizados em dias diferentes, a 7 de Setembro para o concentrador disco parabólico e a 15 de Setembro para o LFR.

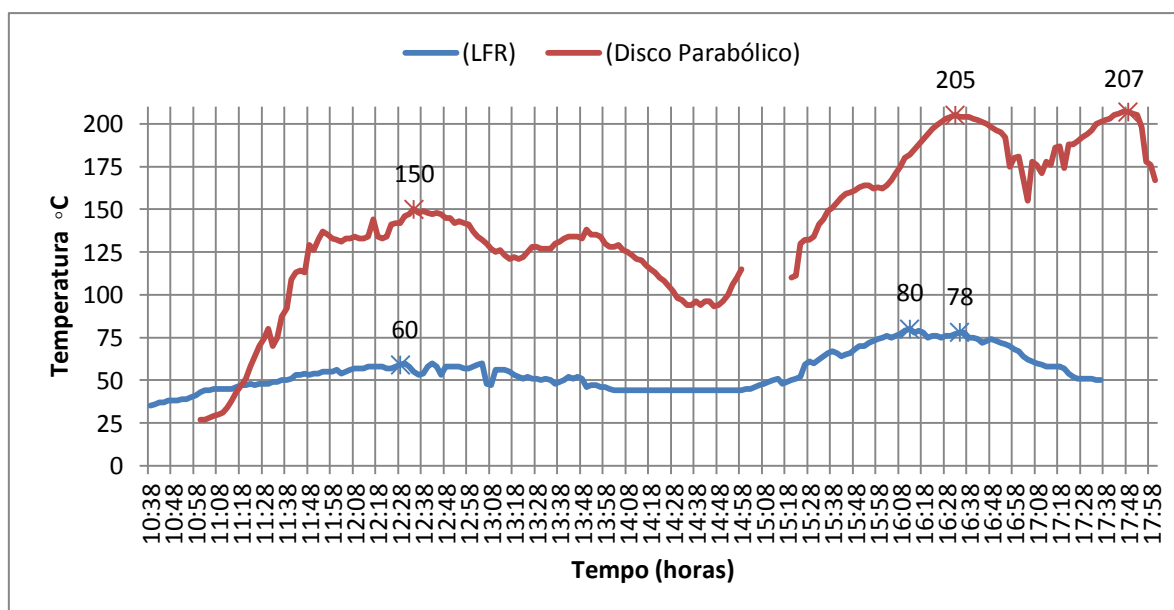


Fig. 31 Temperatura do depósito de sal (tipo de concentrador)

Comparando as diferenças e igualdades entre o concentrador disco parabólico e o concentrador LFR, verifica-se que ambas as curvas de temperatura apresentam perfis de variação idênticos, ao longo dos respetivos dias, mas com amplitudes bastante díspares.

Destaque para os picos máximos de temperatura que ocorreram durante a tarde. Esta situação acontece depois meio-dia solar (13 h, no verão), período em que o Sol se encontra sobre a vertical do lugar e o ângulo de incidência solar tem uma menor obliquidade, originando um maior grau de aquecimento do ar. Com uma temperatura ambiente mais elevada, as perdas por convecção para a envolvente do recetor, são minimizadas.

A razão para uma depressão da temperatura desde as 14 h até às 15 h, deve-se ao aumento da intensidade do vento, aumentando as perdas por convecção. Este fenómeno é mais expressivo no concentrador disco parabólico, porque este não está protegido por uma cavidade isoladora pela qual a radiação passe, e à dir. depósito de sal instalado no concentrador Disco Parabólico Fig. 32, direita.



Fig. 32 Depósito de sal, no interior da cavidade trapezoidal e à dir. depósito de sal instalado no concentrador Disco Parabólico

A razão para não existirem dados para o concentrador do tipo disco parabólico, entre as 15 horas e as 15:18 horas é que durante este tempo foi feito um ajuste aos dados inseridos no comando da orientação.

Para além dos ensaios que acabaram de ser apresentados, foi realizado um teste ao calor específico do sal no interior do depósito. Para tal foi o depósito preenchido com sal foi sujeito a uma temperatura máxima de 500 °C.

Os objetivos passaram por ensaiar a temperatura de fusão do sal, que é de aproximadamente 1074 K (801 °C) e registar os escalões de estabilização térmica, ao longo do decaimento da temperatura.

Esta experiência tem interesse uma vez que, se garantirmos a mudança do estado sólido ao estado líquido do sal, no interior das tubagens do nosso coletor, garantimos que o meio de armazenamento térmico é próprio fluido de trabalho. Denominando-se por sistema de armazenamento térmico direto.

4.3.2 Aquecimento de águas

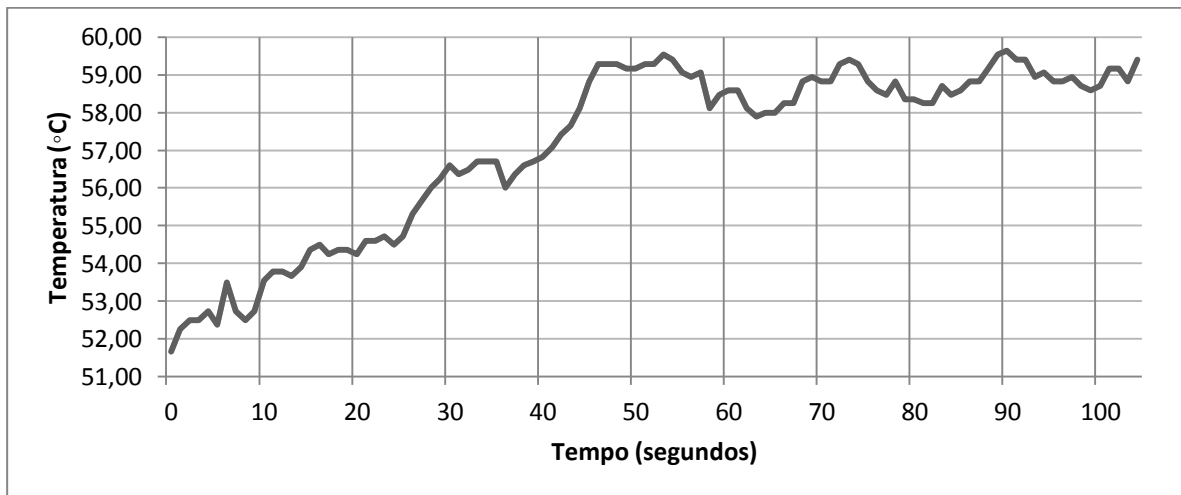


Fig. 33 Temperatura da água (concentrador parabólico)

A eletrobomba instalada no circuito fechado do sistema Disco-Parabólico não funcionou corretamente, isto porque ao fim de sensivelmente dois minutos, quando a temperatura atingiu o limite de 60 °C (temperatura nominal da eletrobomba), a pressão da água aumenta progressivamente até ao ponto de inundar a câmara estanque da bomba, provocando assim, um curto-circuito.

A solução plausível para resolver este problema será a compra de uma bomba de altas temperaturas, mas em vez desta solução, onerosa e pouco fiável, poder-se-á colocar o circuito de aquecimento de água em circuito aberto.

Com base nesta situação o novo protótipo concentrador LFR, foi projetado à partida com um circuito de abastecimento de águas do género vaso aberto, isto na prática implica que a água possa atingir temperaturas mais elevadas, porque não implementa a da bomba de circulação forçada.

O coletor de águas do sistema LFR, é composto por uma grelha de onze tubos de cobre, de 4 mm de diâmetro, soldados a dos tubos de 12 mm de diâmetro.

A grelha coletora é abastecida por um circuito aberto de água, sem pressão. Esta solução de termossifão implica que várias condições construtivas estejam reunidas à partida, para garantir o correto fluxo hidráulico.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS

O objetivo principal do atual projeto foi a construção de um sistema de concentração solar térmico, do tipo LFR para aquisição de temperaturas nos focos de concentração de ambos os concentradores, no interior do depósito preenchido com sal e ainda à saída do coletor de aquecimento de águas.

Os cálculos e medidas realizadas foram posteriormente analisadas e comparadas entre cada um dos sistemas de concentração solar com o intuito de no final avaliar o rendimento global dos sistemas.

Uma breve súmula do contributo obtido com os resultados do trabalho, juntamente com as limitações e indicações para trabalhos futuros, será dada nas seguintes secções deste capítulo.

5.1 CÁLCULOS SOLARES

Devido às características dos concentradores solares, apenas a componente direta da irradiação solar é convertida no ponto ou no plano de concentração, adivinhado o que poderá acontecer em dias com insuficiência solar.

Como limitações destaco a ausência de recursos financeiros e de equipamentos adequados como por exemplo a ausência de uma câmara termográfica ou de um piranómetro e até de um segundo termopar.

Muitas vezes indispensável para fazer medições em simultâneo, para registar a temperatura da água à entrada e à saída do coletor, ou ainda como por exemplo, medir no mesmo instante a temperatura ambiente e a temperatura na região de concentração.

A irradiância solar não foi medida no local, por falta de um piranómetro, no entanto a irradiância do modelo ESRA foi suportada e validada pelos dados de 2005 do projeto SODA.

Portanto todos os modelos utilizados para o cálculo das variáveis foram considerados válidos, expetando algumas incoerências pontuais nas fórmulas adquiridas ao longo da pesquisa.

5.2 DIMENSIONAMENTO

As experiências do coletor LFR estão limitadas a uma temperatura de funcionamento inferior a 100 °C, isto porque o sistema de circulação não está preparado para suportar uma a pressão superior a uma atmosfera, para que tal seja possível, será necessário a substituição da canalização atual por tubagens e mangueras hidráulicas que aguentem altas pressões.

Existência de erros, erros inerentes ao Sistema de Posicionamento Global, que causam erros na determinação da Latitude, Longitude e Altitude. E erros causados por desnível do terreno, ou da própria estrutura mecânica do protótipo.

Erro de tolerância do termopar aplicado nos ensaios de medição da temperatura do depósito de sal. No caso estudado o termopar usado foi do tipo E o qual possui uma tolerância padrão de $\pm 1.7\%$ para temperaturas entre $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $340\text{ }^{\circ}\text{C}$, no caso de temperaturas mais elevadas de $340\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $870\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tolerância é de $\pm 0.5\%$.

Erros de leitura, uma vez que, os dados da temperatura foram adquiridos de forma analógica, por observação visual.

Estes erros, depois associados aos cálculos provocam, com não podia deixar de ser, desvios aos valores finais de Energia, Potência e Rendimento do sistema.

Observou-se que no ensaio prático, o ângulo de elevação do concentrador não foi tido em conta em nenhum modelo de dimensionamento estudado. Portanto à semelhança do que acontece com os painéis solares térmicos e fotovoltaicos, o sistema estudado também terá de ter uma inclinação próxima dos 45° .

Considera-se que o efeito desta tinta preta seletiva não tenha qualquer influência sobre o aumento da temperatura para o depósito de sal.

No entanto este tipo de testes não pode ser dado como conclusivo, pois falta finalizar o mesmo estudo para o coletor de águas quentes.

As condições meteorológicas são um problema recorrente em todo o tipo de coletores e concentradores solares, isto foi verificado na prática. Quando surge uma sombra ou o céu está nublado o sistema atinge valores baixos de temperatura. Outro fator com significativa expressão nas perdas por convecção é a velocidade e direção do vento.

Os testes aqui apresentados têm a garantia de que foram realizados em dias de céu limpo. Facto que limitou a aquisição de mais dados.

O estudo permitiu-nos concluir que a aplicação final deverá ser escolhida consoante o tipo de concentrador implementado e só depois de se efetuarem os ensaios preliminares para determinar a potência do sistema.

Não foi possível aferir nenhum resultado quantitativo apurado quanto ao aquecimento de água para o concentrador LFR, pois a amostra de dados dos ensaios era reduzida e díspar, em termos qualitativos pode-se dizer que o coletor de águas quentes atingiu uma temperatura elevada, mas nunca superior a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

5.3 CONCENTRADOR SOLAR

O concentrador LFR tem uma área de reflexão de $0,594 \text{ m}^2$ para um rácio de concentração geométrico de 6 e um rácio de concentração efetivo de 4,9 (considera sombras e obstruções).

Temperatura máxima teórica no ponto de concentração do concentrador Disco-Parabólico é de $696,21 \text{ K}$ ($421,1 \text{ }^\circ\text{C}$). Enquanto isto, o valor prático da temperatura máxima alcançada no foco de concentração foi de $655,15 \text{ K}$ ($380 \text{ }^\circ\text{C}$).

Temperatura máxima teórica na região central do concentrador LFR é de $468,91 \text{ K}$ ($193,76 \text{ }^\circ\text{C}$). Já a temperatura máxima alcançada na região central de concentração (temperatura interna da cavidade) foi $339,15 \text{ K}$ ($66 \text{ }^\circ\text{C}$).

Irradiação global (Direta e Difusa) incidente no coletor para o dia 15 de Setembro (data em que os cálculos foram realizados) foi estimada em $786,92 \text{ W/m}^2$, pelo modelo ESRA. Da qual, $735,8 \text{ W/m}^2$ pertencem à componente direta e $51,12 \text{ W/m}^2$ à componente difusa.

Em confronto com os dados reais da estação meteorológica de Abrantes, a irradiação global para o mesmo dia é de aproximadamente 800 W/m^2 .

Desprezando a irradiação solar eventualmente refletida por objetos circundantes, tais como edifícios ou veículos, interessa apenas o valor da componente direta da irradiação global, que possibilita o cálculo teórico da potência total da radiação solar refletida, estimada em cerca de $0,437 \text{ kW}$.

O rendimento global (ótico e térmico) do modelo estudado é de aproximadamente 70 %. Sendo que o rendimento ótico foi estimado em cerca de 77 % e o rendimento térmico avaliado em 91 %.

A potência “ótica” absorvida pelo recetor (S_r) têm um valor de aproximadamente $0,337 \text{ kW}$.

As perdas de rendimento mais importantes, são as térmicas. Estas são facilmente mitigadas através do melhoramento do isolamento do recetor e sobretudo da colocação de uma cobertura de vidro.

As perdas térmicas foram avaliadas em cerca de $0,031 \text{ kW}$, valor este que descontado à potência absorvida pelo recetor, equivale à potência total do sistema, ou seja $0,306 \text{ kW}$.

Nota-se que a influência do isolamento térmico no concentrador disco parabólico é elevada, isto porque a diferença entre isolar ou não isolar o depósito de sal, situa-se nos $163 \text{ }^\circ\text{C}$ e os $150 \text{ }^\circ\text{C}$.

Como dificuldade aponto a falta de conhecimentos teóricos sobre o domínio da termodinâmica, sobretudo os estudos sobre as matérias de transferência de calor.

5.4 TRABALHOS FUTUROS

Desenvolver um sistema de seguimento automático do sol, a implementar sob forma de controlo dos motores acoplados em cada um dos eixos dos espelhos.

Aumentar o tamanho do concentrador. Usar espelhos de maior dimensão, sobretudo em comprimento e estudar as variações que ocorrem desta alteração.

Encapsular o recetor de cavidade trapezoidal com um vidro para otimizar quantidade de energia absorvida e para minimizar as perdas. Além disso, experimentar um tipo diferente de desenho para o coletor de águas quentes (por exemplo colocar alhetas em volta dos tubos absorvedores), para maximizar a transferência de calor para o fluido de trabalho.

Com as alterações aos tubos absorvedores do recetor, introduzir na parte posterior um sistema de retenção de calor para permitir períodos de operação mais longos.

Investigar vários geradores de eletricidade possíveis de serem implementadas no sistema analisado anteriormente a este trabalho.

Utilizar o sistema solar térmico para tri-geração.

Investigar várias hipóteses para o fluido de trabalho, usado na transferência de calor, para que este armazene calor.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Steinfeld, Aldo; “Solar thermochemical production of hydrogen- a review”, Solar Energy Reviews, 2004
- [2] C. Chistopher, Newton; “A concentrated solar thermal energy system”; Florida State University; 2007
- [3] <http://www.cienciaviva.pt/rede/himalaya/home/himalaya.asp>; Ciência Viva, acessado a 30-07-2012.
- [4] Mills, David R.; L. Morrison, Graham; “Compact linear Fresnel reflector solar thermal powerplants”, Solar Energy Reviews; 2000
- [5] Singh, Panna Lal; Sarviya, R.M.; Bhagoria, J.L. ; “Thermal performance of linear Fresnel reflecting solar concentrator with trapezoidal cavity absorbers”, Applied Energy Reviews; 2009
- [6] V. Tyagi, V.; C. Kaushik, C.; K. Tyagi, S.; - “Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012
- [7] Baseado em “Solar thermal energy”, Wikipédia, a enciclopédia livre, acesso a 10-03-2012
- [8] Barlev, David; Vidu, Ruxanda; Stroeve, Pieter- “Innovation in concentrated solar power”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011
- [9] Müller-Steinhager, Hans; Trieb, Franz; “Concentrating solar power – A review of the technology”, Ingenia Review, 2004
- [10] Sharma, Atul; “A comprehensive study of solar power in India and World” , Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010
- [11] Fernández- García, A.; Zarza, E.; Valenzuela, L.; Pérez, M.; “Parabolic-Trough solar collectors and their applications”.-. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010
- [12] “Technology Roadmap – Concentrating Solar Power”, International Energy Agency, 2010
- [13] BP World Statistical Review 2011
- [14] <http://www.via-azul.eu/>; “Alternative world energy outlook”; Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 2006, acesso a 26-03-2012.
- [15] Murta Pina, João; “Sistemas renováveis com tecnologia fotovoltaica”; Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNL, 2011

[16] Characterization of solar electricity import corridors from MENA to Europe – Potential, infrastructure and cost”; DLR; 2009

[17] Greenpeace International, ESTELA, SolarPACES, “Concentrating Solar Power- Global Outlook 09 –Why Renewable Energy is Hot”, 2009

[18] Perdigoto, J. ; “Políticas energéticas 2010 – 2020: Eletricidade Solar – Simpósio: Alta concentração solar e produção de eletricidade”, Direcção Geral de Energia e Geologia; 2011

[19] Winter, C. J.; “Hydrogen energy - Abundant, efficient, clean: A debate over the energy-system-of-change”; International Journal of Hydrogen Energy; 2009

[21] Velázquez, N.; García-Valladares, O.; Saucedo, D.; Beltrán, R.; “Numerical simulation of a linear Fresnel reflector Concentrator used as direct generator in a Solar-GAX cycle”; Energy Conversion and Management; 2009

[22] <http://www.csp-world.com/cspworldmap>; “List of CSP plants”, CSP World; acesso a 10-07-2012

[23] Rigollier, Christelle; Bauer, Olivier; Wald, Lucien; “On the clear sky model of the ESRA-European Solar Radiation Atlas – With respect to the Heliosat Method”; Solar Energy Reviews; 1999

[24] Wagner, Michael J.; “Results and Comparison from the SAM Linear Fresnel Technology Performance Model”; NREL; 2012

[25] Facão, Jorge; Oliveira, Armando C; “Numerical simulation of a trapezoidal cavity receiver for a linear Fresnel solar collector concentrator”; Renewable Energy; 2011

[26] <http://www.saint-gobain-solar-power.com/saint-gobain-solar-power/thermosolar-such-story-4>; “Thermosolar such a story”, Saint Gobain; acesso a 19-05-2012

7 ANEXOS

7.1 DIMENSIONAMENTO

A inclinação de cada espelho é obtida para que o raio solar incidente, perpendicular ao plano de abertura, atinja o ponto médio de cada espelho e seja depois refletido para o ponto focal (F), após uma única reflexão.

Condições iniciais: $W=300$; $L=330$ mm, $f=1000$ mm.

Variáveis	
W	Largura do espelho
L	Comprimento do espelho
F	Ponto focal
f	Altura do recetor
Qn	Distância entre a fila n e o centro
Sn	Espaço entre filas de espelhos
θ_n	Ângulo de inclinação da fila n
ξ_0	Meio ângulo de subtensão solar (16')
n	Índice da fileira de espelhos
RC	Rácio de concentração

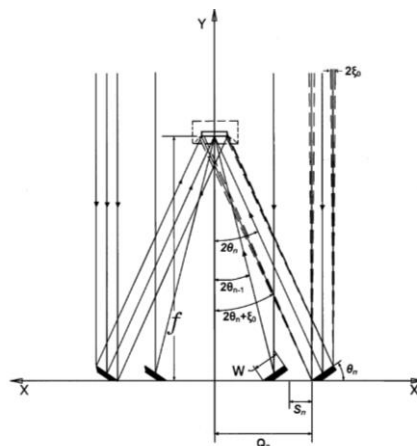


Fig. 34 Esquema de um concentrador solar, sistema LFR.

Tabela 6 Resultados do calculo iterativo.

Espelhos	Fila	Sn (mm)	Qn (mm)	θ_n	$2\theta_n$	$2\theta_n+\xi_0$	$2\theta_n-\xi_0$
Uni.	n	mm	mm	°(graus)	°(graus)	°(graus)	°(graus)
2	1	150,00	150,00	8,35	16,70	16,97	16,43
4	2	28,04	474,86	16,25	32,50	32,77	32,24
6	3	88,00	850,88	23,04	46,08	46,35	45,81
8	4	182,40	1309,34	28,48	56,96	57,23	56,70
10	5	315,10	1888,14	32,66	65,31	65,58	65,05
12	6	493,98	2634,69	35,79	71,59	71,86	71,32
14	7	732,63	3610,66	38,13	76,26	76,53	76,00
16	8	1052,12	4898,76	39,87	79,75	80,01	79,48
18	9	1484,01	6613,01	41,17	82,35	82,62	82,08
20	10	2076,15	8914,97	42,15	84,30	84,57	84,03
22	11	2903,97	12041,35	42,88	85,77	86,03	85,50
24	12	4093,84	16355,02	43,44	86,88	87,15	86,61
26	13	5877,66	22450,51	43,86	87,72	87,99	87,46
28	14	8744,91	31411,72	44,19	88,37	88,64	88,10
30	15	14018,29	45645,13	44,44	88,88	89,15	88,61
32	16	28563,80	74423,12	44,66	89,31	89,58	89,05
34	17	33611,44	108247,96	44,69	89,37	89,64	89,11
36	18	30553,46	139014,70	44,67	89,34	89,60	89,07
38	19	38195,41	177423,47	44,71	89,42	89,68	89,15
40	20	52671,39	230308,06	44,75	89,50	89,77	89,24
42	21	79418,12	309939,23	44,79	89,58	89,85	89,31
44	22	136438,49	446590,63	44,82	89,64	89,91	89,38
46	23	321611,19	768414,61	44,85	89,70	89,96	89,43

7.1.1 Rácio de concentração

A área iluminada do recetor, A_r , considerada para o cálculo do rácio de concentração geométrico é, igual à área de um espelho, $0,099 \text{ m}^2$.

O valor da potência entregue aos tubos absorvedores, S_r , é calculado com base no valor da componente direta da irradiância, $I = 735,8 \text{ W/m}^2$, modelada para o dia 15 de Setembro.

Tabela 7 Resultados dos cálculos para o caso prático em estudo.

Espelhos (uni.)	CI	RC	RCgeo	Ac m²	Anc m²	(*% de Ac) m²	Sr (kW)
2	0,9422	1,9	2,00	0,198	0,15	24%	0,028
4	0,8294	3,5	4,00	0,396	0,12	30%	0,163
6	0,6825	4,9	6,00	0,594	0,18	30%	0,245
8	0,5368	6,0	8,00	0,792	0,30	37%	0,290
10	0,4116	6,8	10,00	0,99	0,50	51%	0,285
12	0,3115	7,4	12,00	1,188	0,83	70%	0,210
14	0,2343	7,9	14,00	1,386	1,31	95%	0,042
16	0,1757	8,2	16,00	1,584	2,01	127%	-0,248
18	0,1315	8,5	18,00	1,782	2,99	168%	-0,706
20	0,0981	8,7	20,00	1,98	4,36	220%	-1,392
22	0,0738	8,9	22,00	2,178	6,27	288%	-2,398
24	0,0549	9,0	24,00	2,376	8,98	378%	-3,864
26	0,0403	9,0	26,00	2,574	12,86	499%	-6,019
28	0,0290	9,1	28,00	2,772	18,63	672%	-9,282
30	0,0200	9,1	30,00	2,97	27,88	939%	-14,583
32	0,0123	9,2	32,00	3,168	46,73	1475%	-25,504
34	0,0062	9,2	34,00	3,366	309,33	9190%	-19,659
36	0,0039	9,2	36,00	3,564	301,92	8471%	-29,330
38	0,0016	9,2	38,00	3,762	312,47	8306%	-40,861
40	0,0034	9,2	40,00	3,96	329,08	8310%	-53,415
42	0,0070	9,2	42,00	4,158	341,88	8222%	-80,368
44	0,0171	9,2	44,00	4,356	353,80	8122%	-94,490
46	-0,4883	8,3	46,00	4,554	365,72	8031%	Sr (kW)

7.2 DADOS REAIS IRRADIÂNCIA

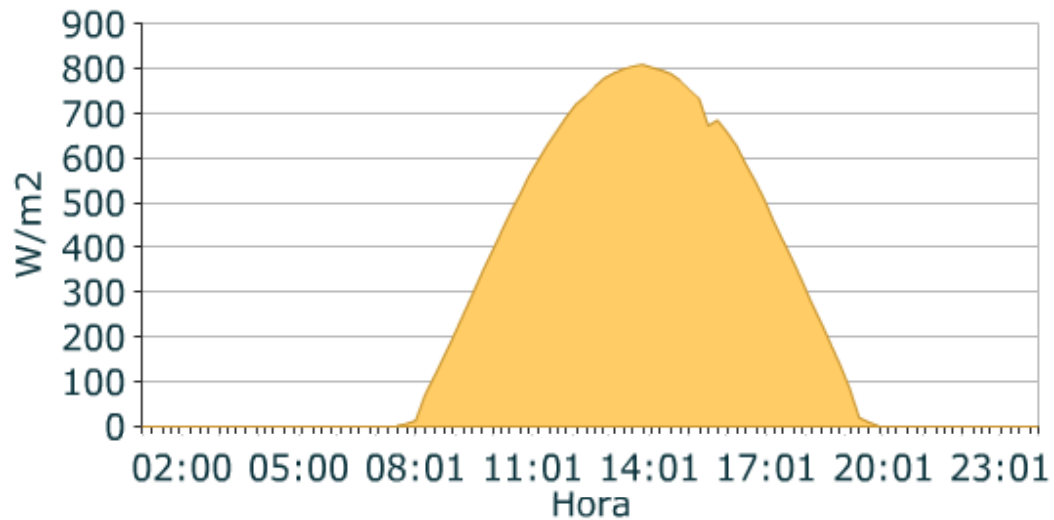


Fig. 35 Irradiância solar para o dia 15 de Setembro.

Fonte: meteoabranter.com⁸, acedido dia 16 de Setembro às 00:01.

⁸ O projeto “meteoabranter” disponibiliza dados reais e previsões meteorológicas em tempo real para a cidade de Abrantes. Encontrando-se a estação meteorológica a uma distância de aproximadamente 2 km do local de testes.

7.3 DADOS REAIS IRRADIAÇÃO

Os dados de irradiação solar para a região de Abrantes, são referentes ao ano de 2005 para o dia 15 de Setembro, para uma frequência de atualização de 60 minutos.

HelioClim-3 Database of Solar Irradiance v3 (derived from satellite data)
Provider;MINES ParisTech - Armines (France)
More information at;<http://www.helioclim.org>
Site latitude (positive means North);39.460
Site longitude (positive means East);-8.200
Elevation (m);124
Tilt angle (degrees);-999 (tracking)
Azimuth angle (degrees);-999 (tracking)
Albedo of the ground;0.20
Date beginning;2005-09-15
Date end;2005-09-15
Time reference (decimal hour);TU
Summarization (period of integration);Hour (h)
Date - Instant; The date or instant given for each value corresponds to the end of the summarization
Irradiation (Wh/m2);Irradiation over the period (-999 if no data)
Top of Atmosphere (Wh/m2);Irradiation over the period at the top of the atmosphere (extraterrestrial)

Hourly irradiation in Wh/m2 on mobile surface following the sun at normal incidence from HelioClim-3

Year;Month;Day;Hour;Direct NI;Diffuse NI;Reflected;Global NI;Direct Horiz;Diffus Horiz;Global Horiz;Top of atmosphere;

2005;9;15;01.0000;0;0;0;0;0;0;0;0;0;
2005;9;15;02.0000;0;0;0;0;0;0;0;0;0;
2005;9;15;03.0000;0;0;0;0;0;0;0;0;0;
2005;9;15;04.0000;0;0;0;0;0;0;0;0;0;
2005;9;15;05.0000;0;0;0;0;0;0;0;0;0;
2005;9;15;06.0000;0;0;0;0;0;0;0;0;0;
2005;9;15;07.0000;28;16;2;46;3;18;21;68;
2005;9;15;08.0000;313;89;10;412;82;59;142;326;
2005;9;15;09.0000;632;153;21;806;271;96;367;576;
2005;9;15;10.0000;739;176;23;938;433;125;558;790;
2005;9;15;11.0000;819;176;21;1017;578;138;715;953;
2005;9;15;12.0000;845;178;18;1041;659;148;807;1054;
2005;9;15;13.0000;**845**;181;16;1043;678;154;832;1086;
2005;9;15;14.0000;822;185;18;1025;636;154;790;1047;
2005;9;15;15.0000;653;222;19;895;454;183;637;939;
2005;9;15;16.0000;572;201;21;794;328;157;484;771;
2005;9;15;17.0000;502;152;18;673;210;105;315;552;
2005;9;15;18.0000;304;87;10;400;70;55;126;300;
2005;9;15;19.0000;24;16;2;41;2;15;17;50;
2005;9;15;20.0000;0;0;0;0;0;0;0;0;0;
2005;9;15;21.0000;0;0;0;0;0;0;0;0;0;
2005;9;15;22.0000;0;0;0;0;0;0;0;0;0;
2005;9;15;23.0000;0;0;0;0;0;0;0;0;0;
2005;9;15;24.0000;0;0;0;0;0;0;0;0;0;

Tabela 8 Lista de centrais CSP [22]

Nome	Promotor	País	Tecnologia	Estado	Potência
Hassi R'mel ISCC	Sonatrach	Argélia	Parabolic trough - ISCC	Operacional	20.0 MW
Kuraymat ISCC	NREA	Egipto	Parabolic trough - ISCC	Operacional	40.0 MW
Aïn Beni Mathar ISCC	Office Nationale de l'Electricite	Marrocos	Parabolic trough - ISCC	Operacional	20.0 MW
Alvarado 1 (La Risca)	Acciona Energia, Mitsubihi Corp	Espanha	Parabolic trough	Operacional	50.0 MW
Andasol 1	RREEF, Antin, Cobra	Espanha	Parabolic trough	Operacional	50.0 MW
Andasol 2	RREEF, Antin, Cobra	Espanha	Parabolic trough	Operacional	50.0 MW
Andasol 3	Ferrostaal, RWE, Rhein E, SWM, Solar Millenium	Espanha	Parabolic trough	Operacional	50.0 MW
Arcosol 50 (Valle 1)	Torresol Energy	Espanha	Parabolic trough	Operacional	50.0 MW
Aste 1A	Elecnor, Eiser, Aries	Espanha	Parabolic trough	Operacional	50.0 MW
Aste 1B	Elecnor, Eiser, Aries	Espanha	Parabolic trough	Operacional	50.0 MW
Astexol II	Elecnor, Eiser, Aries	Espanha	Parabolic trough	Operacional	50.0 MW
Extresol 1	Cobra	Espanha	Parabolic trough	Operacional	50.0 MW
Extresol 2	Cobra	Espanha	Parabolic trough	Operacional	50.0 MW
Helioenergy 1	Abengoa Solar, EON	Espanha	Parabolic trough	Operacional	50.0 MW
Helioenergy 2	Abengoa Solar, EON	Espanha	Parabolic trough	Operacional	50.0 MW
Helios 1	Abengoa Solar	Espanha	Parabolic trough	Operacional	50.0 MW
Ibersol Puertollano	Iberdrola	Espanha	Parabolic trough	Operacional	50.0 MW
La Dehesa	Renovables SAMCA	Espanha	Parabolic trough	Operacional	50.0 MW
La Florida	Renovables SAMCA	Espanha	Parabolic trough	Operacional	50.0 MW
Lebrija 1	Valoriza, Siemens	Espanha	Parabolic trough	Operacional	50.0 MW
Majadas	Acciona Energia	Espanha	Parabolic trough	Operacional	50.0 MW
Manchasol 1	Cobra	Espanha	Parabolic trough	Operacional	50.0 MW
Manchasol 2	Cobra	Espanha	Parabolic trough	Operacional	50.0 MW
Moron	Ibereolica	Espanha	Parabolic trough	Operacional	50.0 MW
Palma del Rio I	Acciona Energia, Mitsubihi Corp	Espanha	Parabolic trough	Operacional	50.0 MW
Palma del Rio II	Acciona Energia	Espanha	Parabolic trough	Operacional	50.0 MW
Solaben 3	Abengoa Solar, Itochu	Espanha	Parabolic trough	Operacional	50.0 MW

Solacor 1	Abengoa Solar, JGC	Espanha	Parabolic trough	Operacional	50.0 MW
Solacor 2	Abengoa Solar, JGC	Espanha	Parabolic trough	Operacional	50.0 MW
Solnova 1	Abengoa Solar	Espanha	Parabolic trough	Operacional	50.0 MW
Solnova 3	Abengoa Solar	Espanha	Parabolic trough	Operacional	50.0 MW
Solnova 4	Abengoa Solar	Espanha	Parabolic trough	Operacional	50.0 MW
Termesol 50 (Valle 2)	Torresol Energy	Espanha	Parabolic trough	Operacional	50.0 MW
Puerto Errado 2	Novatec Solar	Espanha	Fresnel	Operacional	30.0 MW
Gemasolar	Torresol Energy	Espanha	Parabolic trough	Operacional	20.0 MW
PS20	Abengoa Solar	Espanha	Central receiver (power tower)	Operacional	20.0 MW
PS10	Abengoa Solar	Espanha	Central receiver (power tower)	Operacional	11.0 MW
Puerto Errado 1	Novatec Solar	Espanha	Fresnel	Operacional	1.4 MW
TSE1 - PT	Thai Solar Energy	Tailândia	Parabolic trough	Operacional	5.0 MW
SEGS IX	NextEra	E.U.A.	Parabolic trough	Operacional	80.0 MW
SEGS VIII	NextEra	E.U.A.	Parabolic trough	Operacional	80.0 MW
Martin Next Generation Solar Energy Center	Florida Power & Light	E.U.A.	Parabolic trough - ISCC	Operacional	75.0 MW
Nevada Solar One	Acciona Energia	E.U.A.	Parabolic trough	Operacional	64.0 MW
Kimberlina STPP	Areva	E.U.A.	Fresnel	Operacional	5.0 MW
Sierra SunTower	eSolar	E.U.A.	Central receiver (power tower)	Operacional	5.0 MW
Ivanpah SEGS	BrightSource Energy	E.U.A.	Parabolic trough	Em construção	370.0 MW
SEGS II	Cogentrix	E.U.A.	Parabolic trough	Operacional	30.0 MW
SEGS III	NextEra	E.U.A.	Parabolic trough	Operacional	30.0 MW
SEGS IV	NextEra	E.U.A.	Parabolic trough	Operacional	30.0 MW
SEGS V	NextEra	E.U.A.	Parabolic trough	Operacional	30.0 MW
SEGS VI	NextEra	E.U.A.	Parabolic trough	Operacional	30.0 MW
SEGS VII	NextEra	E.U.A.	Parabolic trough	Operacional	30.0 MW
Genesis Solar	NextEra	E.U.A.	Parabolic trough	Em construção	250.0 MW
Mojave Solar	Abengoa Solar	E.U.A.	Parabolic trough	Em construção	250.0 MW
Solana	Abengoa Solar	E.U.A.	Parabolic trough	Em construção	250.0 MW
Cameo	Xcel Energy	E.U.A.	Parabolic trough - Coal	Operacional	2.0 MW

Holaniku	Sopogy	E.U.A.	Parabolic trough	Operacional	2.0 MW
SEGS I	Cogentrix	E.U.A.	Parabolic trough	Operacional	14.0 MW
Crescent Dunes	SolarReserve	E.U.A.	Central receiver (power tower)	Em construção	110.0 MW
Maricopa Solar Project	Tessera Solar	E.U.A.	Dish Stirling		1.5 MW
Saguaro	Arizona Public Service	E.U.A.	Parabolic trough	Operacional	1.0 MW